Unterstützung der messtechnischen Langzeitüberwachung sicherheitsrelevanter Ingenieurbauwerke basierend auf einem Multiagentensystemansatz

Von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der
Ruhr-Universität Bochum genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von

Ingo Mittrup

Bochum, 2010

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2004 bis 2010 während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen an der Ruhr-Universität Bochum. Sie wurde von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften als Dissertation angenommen. Während meiner Zeit am Lehrstuhl habe ich das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Forschungsprojekt „Agentenbasierte Überwachung sicherheitsrelevanter Ingenieurbauwerke, insbesondere Staubauwerke“ und einen Teilbereich des europäischen Großforschungsprojektes „Tunconstruct – Technology Innovation in Underground Construction“ bearbeitet. Viele der bei der Bearbeitung des DFG-Forschungsprojektes gewonnene Erkenntnisse sind in die vorliegende Arbeit eingeflossen.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein außerordentlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietrich Hartmann für die Anregung zu dieser Arbeit, für seine ausgezeichnete wissenschaftliche Betreuung und für die persönliche Unterstützung während meiner Zeit an seinem Lehrstuhl. Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus König danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferats und sein Interesse an meiner Arbeit. Für seine Tätigkeit als fachfremder Gutachter danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes. Dem Ruhrverband danke ich für die freundliche Bereitstellung von Mess- und Überwachungsdaten.

Darüber hinaus danke ich allen Kollegen am Lehrstuhl für Ingenieurinformatik für ihre stete Hilfsbereitschaft. In diesem Zusammenhang möchte ich besonders meine Kollegen Andrés Wellmann Jelic, Kai Oberste-Ufer, Karlheinz Lehner und Kai Erlemann hervorheben, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt schließlich meiner Ehefrau María del Carmen für ihre Geduld, tatkräftige Unterstützung und ihren Rückhalt während der Fertigstellung dieser Arbeit. Zuletzt danke ich herzlich meinen Eltern, die mich stets in jeder Hinsicht unterstützt und auf diese Weise die Voraussetzung für diese Arbeit geschaffen haben.

Bochum, im März 2010 *Ingo Mittrup*

Tag der Einreichung: 05.01.2010
Tag der mündlichen Prüfung: 19.02.2010

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. D. Hartmann
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. König

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **iv**

Listingsverzeichnis **vii**

I Grundlagen **1**

1 Einleitung **3**
1.1 Problemstellung 3
1.2 Aufbau der Arbeit 6

2 Stand der Forschung **9**
2.1 Bauwerksüberwachung 9
2.1.1 Inspektion und Prüfung von Bauwerken 10
2.1.2 Zusätzliche Untersuchungen am Bauwerk 11
2.2 Bauwerksmonitoring 13
2.2.1 Definition 13
2.2.2 Konzept 14
2.2.3 Dauer und Frequenz von Messungen 15
2.2.4 Messgrößen 16
2.2.5 Messeinrichtungen 17
2.2.6 Zustandserfassungsstrategie 18
2.2.7 Schadenserkennungsstrategie 19
2.2.8 Bewertung der Bauwerkssicherheit 20
2.2.9 Beispielanwendungen 21
2.3 Bauwerksmonitoringsysteme 24
2.3.1 Systemarchitektur 24
2.3.2 Datenerfassungssysteme 25
2.3.3 Datenübertragungs- und Datenspeicherungsmechanismen 26
2.3.4 Datenverwaltung und -auswertung 27

3 Multiagentensysteme **29**
3.1 Softwareagenten und Multiagentensysteme 29
3.1.1 Definition 29
3.1.2 Sichtweise auf ein Multiagentensystem 30
3.1.3 Agentenbegriff 31
3.2 Agentenarchitekturen 32
3.2.1 Deliberative Architekturen 32
3.2.2 Reaktive Architekturen 33
3.2.3 Hybride Architekturen 34

3.3 Kommunikation und Koordination . . . 34
3.3.1 Sprechakte . . . 34
3.3.2 Kommunikationssprachen . . . 35
3.3.3 Interaktionsprotokolle . . . 37
3.3.4 Koordination . . . 37
3.3.5 Ontologien . . . 39
3.4 Agentenorientierte Software-Entwicklung . . . 41
3.4.1 Entwicklungsmethodologien . . . 42
3.4.2 FIPA-Standards . . . 42
3.4.3 Agentenplattform JADE . . . 44
3.5 Entwicklungsstand von Agentensystemen . . . 45

II Konzept **49**

4 Konzeption **51**
4.1 Analyse eines Monitoringablaufs . . . 51
4.1.1 Problembeschreibung . . . 51
4.1.2 Monitoringablauf . . . 53
4.1.3 Formalisierung . . . 56
4.2 Agentenorientierte Analyse . . . 57
4.2.1 Anforderungen . . . 58
4.2.2 Erstidentifikation von Agententypen . . . 60
4.3 Agentenorientierter Entwurf . . . 61
4.3.1 Ergänzung der Agententypen . . . 61
4.3.2 Bekanntschaften und Interaktionen . . . 62
4.3.3 Dienste . . . 64
4.4 Problemlösungskompetenzen . . . 65
4.4.1 Intelligente Steuerung des Datenerfassungsvorgangs . . . 66
4.4.2 Filterung von Messdaten . . . 66
4.4.3 Rechnerbasierte Prognose des Bauwerksverhaltens . . . 67
4.4.4 Automatisierte Bewertung von Messdaten . . . 68
4.4.5 Systemüberwachung und -diagnose . . . 73
4.5 Ressourcen . . . 74
4.5.1 Messeinrichtungen . . . 74
4.5.2 Messdateien . . . 75
4.5.3 Messdatenbanken . . . 76
4.5.4 Statistiksoftware . . . 76
4.6 Informationsmodellierung . . . 77
4.6.1 Datenmodellierung . . . 77
4.6.2 Integration von proprietären Messdatenformaten . . . 79

III Umsetzung **81**

5 Implementierung **83**
5.1 Vorbemerkungen . . . 83
5.2 Erfassung von Messdaten . . . 84
5.2.1 Sensorikagent . . . 84
5.2.2 Messdateiagent . . . 86
5.2.3 Kommunikation mit Mess- und Datenerfassungssystemen . . . 87

5.3 Verteilung von Messdaten . . . 89
5.3.1 Datenverteilungsagent . . . 89
5.4 Aufbereitung von Messdaten . . . 91
5.4.1 Datenverarbeitungsagent . . . 91
5.5 Pflege von Messdaten . . . 92
5.5.1 Datenspeicherungsagent . . . 92
5.5.2 Datenbankschema . . . 94
5.6 Nutzung von Messdaten . . . 96
5.6.1 Berichtsagent . . . 96
5.6.2 Filteragent . . . 97
5.6.3 Statistikagent . . . 98
5.6.4 Persönlicher Agent . . . 99
5.7 Selbstdiagnose/Selbstüberwachung . . . 101
5.7.1 Systemüberwachungsagent . . . 101
5.8 Montoring-Ontologie . . . 101
5.9 Verteilungskonzept für die Praxis . . . 104

6 Validierung 107
6.1 Talsperrenüberwachung . . . 107
6.1.1 Analyse- und Prognosemodelle für Staumauern . . . 107
6.1.2 Talsperrenüberwachung nach DIN 19700 . . . 109
6.2 Überwachungsszenario . . . 112
6.2.1 Referenzsystem Ennepetalsperre . . . 112
6.2.2 Messdaten . . . 114
6.2.3 Fiktives Szenario . . . 116
6.3 Plausibilitätskontrolle der Messwerte . . . 116
6.3.1 Erkennung grober Abweichungen und rechnerbasierte Vorbewertung . 116
6.3.2 Ansicht der aktuellen Messdaten . . . 117
6.3.3 Kurzfristige Kontrolle der Messwerte . . . 119
6.4 Analyse der Messwerte . . . 121
6.4.1 Auswahl und Ansicht der Messschriebe . . . 121
6.4.2 Regressionsanalyse der radialen Verformungen . . . 123
6.4.3 Klassifizierung der radialen Verformungen . . . 125
6.5 Zusammenfassende Wertung . . . 127

7 Zusammenfassung und Ausblick 129
7.1 Zusammenfassung . . . 129
7.2 Bewertung der Ergebnisse . . . 130
7.3 Ausblick . . . 131

IV Anhang 133

A Datenlogger 135
A.1 Definition . . . 135
A.2 Analyse der Funktionalitäten eines Datenloggers . . . 136
A.2.1 Interne Zeitmessung und -steuerung . . . 136
A.2.2 Anschlussmöglichkeiten für Sensoren . . . 136
A.2.3 Interner Speicher . . . 136
A.2.4 Schnittstelle zum externen Rechner . . . 137
A.3 Datenlogger DataTaker DT600 . . . 137

B Analyseverfahren **139**
B.1 Kenngrößen und Testverfahren . . . 139
B.1.1 Regressionsanalyse . . . 139
B.1.2 Korrelation . . . 139
B.1.3 k-means-Clusteranalyse . . . 140
B.1.4 Mann-Kendall-Test . . . 140
B.1.5 Mann-Whitney-Test . . . 141
B.1.6 Chow-Test . . . 142

C Artefakte und Modelle **143**
C.1 Anwendungsfälle . . . 144
C.1.1 Anwendungsfall AF1: Bauwerksphänomene erfassen . . . 144
C.1.2 Anwendungsfall AF2: Messdaten ansehen . . . 145
C.1.3 Anwendungsfall AF3: Messdaten importieren . . . 146
C.1.4 Anwendungsfall AF4: Messdaten archivieren . . . 147
C.1.5 Anwendungsfall AF5: Messdaten verwalten . . . 148
C.1.6 Anwendungsfall AF6: Messdaten grafisch aufbereiten . . . 149
C.1.7 Anwendungsfall AF7: Messdaten auswerten . . . 150
C.1.8 Anwendungsfall AF8: Messdaten extrahieren . . . 151
C.1.9 Anwendungsfall AF9: Rohdatenformate verarbeiten . . . 152
C.2 Verantwortlichkeiten . . . 153
C.3 Bekanntschaften . . . 155
C.4 Interaktionstabellen . . . 156
C.4.1 Sensorikagent . . . 156
C.4.2 Messdateiagent . . . 156
C.4.3 Datenverteilungsagent . . . 157
C.4.4 Datenverarbeitungsagent . . . 157
C.4.5 Datenspeicherungsagent . . . 158
C.4.6 Berichtsagent . . . 158
C.4.7 Filteragent . . . 159
C.4.8 Statistikagent . . . 159
C.4.9 Persönlicher Agent . . . 160
C.4.10 Observer-Agent . . . 161
C.5 Dienstbeschreibungen . . . 162
C.5.1 Sensorikagent . . . 162
C.5.2 Messdateiagent . . . 162
C.5.3 Datenverteilungsagent . . . 162
C.5.4 Datenverarbeitungsagent . . . 163
C.5.5 Statistikagent . . . 163
C.5.6 Datenspeicherungsagent . . . 163
C.5.7 Persönlicher Agent . . . 164

Literaturverzeichnis **175**

Abbildungsverzeichnis

1.1 Vergleich der zeitlichen Abfolge von Inspektionen 4
1.2 Kollaps der Interstate 35 W in Minneapolis 5

2.1 Degradation der Bauwerkstragfähigkeit 10
2.2 Anwendung von SHM in intelligenten Materialien 14
2.3 Inhalte für ein Monitoringkonzept 15
2.4 Messstrategien für das Langzeitmonitoring 16
2.5 Messgrößen 17
2.6 Bewertungsverfahren 20
2.7 Verteilte dezentrale Datenerfassungsarchitektur 25
2.8 Datenerfassungssysteme 26

3.1 Sicht auf ein Multiagentensystem nach Jennings 30
3.2 Aufbau eines Agenten mit BDI-Architektur 33
3.3 Subsumptionsarchitektur nach Brooks 34
3.4 FIPA-Request-Interaktionsprotokoll 38
3.5 Phasen des Contract Net-Interaktionsprotokolls 39
3.6 RDF-Tripel 40
3.7 Inhalts-Referenzmodell der Agentenplattform JADE 41
3.8 Einzelschritte der JADE-Entwicklungsmethode 43
3.9 Grafische Benutzungsschnittstelle von JADE 44
3.10 Drei-Ebenen-Modell aus [Bilek 06] 46

4.1 Angestrebtes verteiltes Monitoringsystem mit integrierten Mess- und Datenerfassungssystemen (Sytemskizze) 52
4.2 Beispielhaft betrachteter Monitoringablauf 55
4.3 Monitoringprozess 56
4.4 Anwendungsfälle Bauwerksmonitoringsystem 59
4.5 Dienste des Sensorikagenten 65
4.6 Agentenbasierte Steuerung des Datenerfassungsvorganges 66
4.7 Prognosemodell für die Ennepestaumauer 68
4.8 Agentenlebenszyklus 73
4.9 Kommunikation mit Messeinrichtungen 75
4.10 Zugriff auf Messdateien 76
4.11 Domänenmodell für das Bauwerksmonitoring 78
4.12 SensorML-Datenmodell zur Abbildung von Sensoren und Messprozessen . . . 79

5.1 Grobarchitektur des Bauwerksmonitoringsystems RAMON 84
5.2 Verhaltensbausteine des Sensorikagenten 85
5.3 Paket `de.rub.bi.inf.monitoring.sensors` (UML-Klassendiagramm) 86

5.4 Verhaltensbausteine des Messdateiagenten 87
5.5 Zugriff des Sensorikagenten auf Mess- und Datenerfassungsgeräte 88
5.6 Verhaltensbausteine des Datenverteilungsagenten 89
5.7 Paket `de.rub.bi.inf.monitoring.daq` 90
5.8 Verhaltensbausteine des Datenverarbeitungsagenten 91
5.9 Einzelschritte zur Datenverarbeitung (UML-Aktivitätsdiagramm) 92
5.10 Verhaltensbausteine des Datenspeicherungsagenten 92
5.11 Datenbankschema zur persistenten Speicherung der Messdaten 95
5.12 Verhaltensbausteine des Berichtsagenten 96
5.13 Einzelschritte zur Berichtserstellung (UML-Aktivitätsdiagramm) 97
5.14 Verhaltensbausteine des Filteragenten 97
5.15 Verhaltensbausteine des Statistikagenten 98
5.16 Verhaltensbausteine des persönlichen Agenten 99
5.17 Grafische Benutzungsschnittstelle des persönlichen Agenten 100
5.18 Verhaltensbausteine des Systemüberwachungsagenten 101
5.19 Entwickelte Bauwerksmonitoring-Ontologie 103
5.20 Detailarchitektur und Verteilung des Bauwerksmonitoringsystems 105

6.1 Anordnung von Mess- und Kontrolleinrichtungen 111
6.2 Staumauer der Ennepetalsperre 112
6.3 Messquerschnitte der Ennepetalsperre und Lage der Messeinrichtungen 113
6.4 Zugrundegelegte Messwerte 115
6.5 Unterfenster zur Visualisierung der automatisiert durchgeführten Vorbewertung der Messwerte für die Ennepetalsperre 117
6.6 Zugriff auf aktuelle Messwerte („Online-Daten“) 118
6.7 Unterfenster zur Visualisierung der Online-Daten 118
6.8 Automatisch generierter Messbericht 120
6.9 Zugriff auf gespeicherte Messwerte über die grafische Benutzungsschnittstelle 122
6.10 Unterfenster zur Visualisierung der Messwerte als Zeitreihe 122
6.11 Darstellung der Zeitreihen 123
6.12 Unterfenster mit Konsole zur Durchführung statistischer Analysen 124
6.13 Radiale Verformungen und angepasstes Regressionsmodell 125
6.14 Automatische Gruppierung der Messwerte 126

C.1 Bekanntschaften 155
C.2 Dienstbeschreibung des Sensorikagenten 162
C.3 Dienstbeschreibung des Messdateiagenten 162
C.4 Dienstbeschreibung des Datenverteilungsagenten 162
C.5 Dienstbeschreibung des Datenverarbeitungsagenten 163
C.6 Dienstbeschreibung des Statistikagenten 163
C.7 Dienstbeschreibung des Datenspeicherungsagenten 163
C.8 Dienstbeschreibung des persönlichen Agenten 164

Listings

3.1 KQML-Beispielnachricht 35
5.1 Instanziierung einer seriellen Schnittstelle mittels des Comm API 88
5.2 Repräsentation eines Messwertes in FIPA-SL 93
5.3 Methode zur Kommunikation mit der Statistiksoftware R 98
5.4 Interaktion mit dem AMS mittels des vorgefertigen Verhaltensbausteins AMS-Subscriber 101
6.1 Zusammenfassung des berechneten Regressionsmodells 124

Teil I

Grundlagen

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Das Bauingenieurwesen steht zu Beginn des 21. Jahrhunderts vor einer großen strukturellen Veränderung. Die Entwicklung neuer Infrastruktur, traditionsgemäß das Hauptinteresse des Bauingenieurwesens, wird zunehmend durch die Erhaltung und Revitalisierung der bestehenden Infrastruktur verdrängt. Ein Hauptgrund für diese Aufgabenverschiebung ist das Alter der gebauten Infrastruktur, die in den alten Bundesländern größtenteils aus den 1960er und 1970er Jahren stammt und die planmäßige Nutzungsdauer erreicht oder bereits überschritten hat. Ein Neubau dieser Ingenieurbauwerke ist heute aus wirtschaftlichen oder politischen Gründen oftmals nicht möglich. Zur Verlängerung der Bauwerkslebensdauer müssen die bestehenden Bauwerke deshalb gezielt instandgehalten werden und fortlaufend auf ihre Sicherheit hin überprüft werden, damit sie die während ihrer Nutzung gestiegenen Anforderungen an Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit erfüllen und hierdurch eine gefahrlose Nutzung der Bauwerke sichergestellt ist.

Mit der Alterung der bestehenden Bauwerke rückt eine kosteneffiziente Erhaltung der Bauwerkssubstanz in den Vordergrund. Die Grundlage der Erhaltungsplanung sowie der haushalts- und verkehrstechnischen Entscheidungen bilden auch heute noch die im Rahmen von Bauwerksprüfungen gewonnenen Informationen [Friebel 01]. Sicherheitsrelevante Ingenieurbauwerke wie Brücken, Tunnel oder Talsperren werden dazu laufend oder in regelmäßigen Abständen — zumeist mithilfe visueller Inspektionen oder bei besonders sicherheitskritischen Bauwerken mittels geeigneter Messeinrichtungen — überwacht und geprüft. So schreibt die für die Zustandserfassung von Straßenbrücken gültige Norm DIN 1076 [DIN 1076 99] zeitlich gestaffelte Bauwerksprüfungen vor, die von regelmäßigen, relativ oberflächlichen Prüfungen alle drei bis vier Monate über einfache Prüfungen im Dreijahresintervall bis zu Hauptuntersuchungen im Sechsjahresintervall reichen (vergleiche Abbildung 1.1).

Das Ziel dieser regelmäßigen Kontrollen ist die Ermittlung und Sammlung von Bauzustandsdaten und eine frühzeitige Erkennung von Schäden. Die inspektionsbasierte Zustands- und Schadenserfassung mit relativ langen Inspektionsintervallen sowie die herkömmliche Dokumentation der verfügbaren Daten (bei Straßenbrücken z.B. in Bauwerksverzeichnis, -akte und -buch) hat in der Praxis jedoch dazu geführt, dass wichtige Informationen über den aktuellen Bauwerkszustand häufig nicht direkt zur Verfügung stehen und dass Kenntnisse über Schädigungsmechanismen oder technische Planungsfehler erst verzögert gewonnen werden [Lücken 04]. In der Folge fallen für die Erhaltung der bestehenden Bauwerke erhebliche

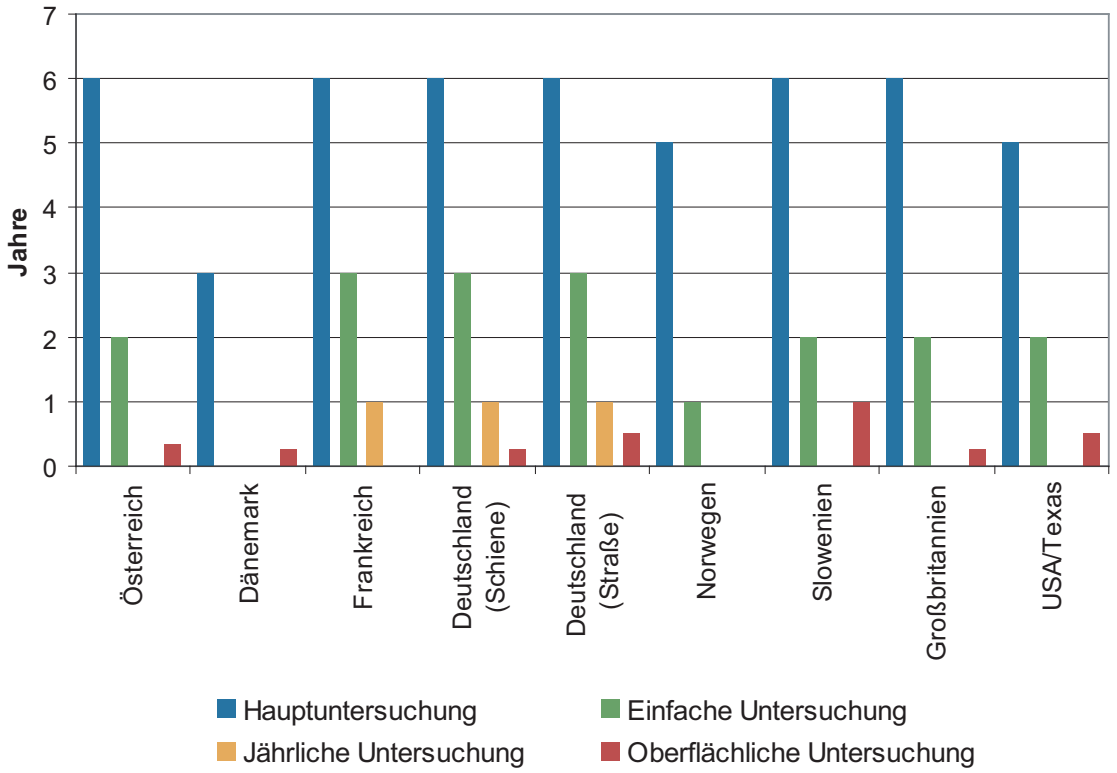


Abbildung 1.1: Vergleich und zeitliche Abfolge der Inspektionen weltweit [Mehdianpour 04]

Kosten an, da aufgrund der fehlenden Informationen keine technisch und wirtschaftlich optimierte, frühzeitige Erhaltungsplanung möglich ist.

Die Forderung nach geeigneten technischen Lösungen zur Optimierung der Bauwerkserhaltung hat weltweit zur Entwicklung von Bauwerksmanagementsystemen [Haardt 99] und neuartigen Überwachungstechniken geführt, die die Verfügbarkeit von Informationen über den Bauwerkszustand nachhaltig verbessern. Zur Gewinnung zusätzlicher Informationen über ein Bauwerk und zur Objektivierung von visuellen Kontrollen wird gegenwärtig verstärkt die messtechnische Zustandsüberwachung von Bauwerken, das Bauwerksmonitoring[1], genutzt. Durch die fortlaufende Erfassung von Systemparametern und Einwirkungen auf das Bauwerk stehen wichtige Größen zur quantitativen Bewertung des Bauwerksverhaltens zur Verfügung, sodass verborgene strukturelle Veränderungen frühzeitig erkannt und ein Strukturversagen verhindert werden kann. Nach zuletzt spektakulären Schadensfällen wie dem Kollaps der Interstate 35W Brücke in Minneapolis (vgl. Abb. 1.2), die aufgrund eines Planungsfehlers [Holt 08; BBC News 08; Minnesota Department of Transportation 08] plötzlich und ohne ein erkennbares Voranzeichen einstürzte, werden Systeme zur messtechnischen Zustandsüberwachung auch in der Öffentlichkeit verstärkt wahrgenommen und als „Sicherheitsmesstechnik“ bzw. „Frühwarnsysteme“ begriffen, die vor Katastrophenfällen schützen.

Aus technischer Sicht sind die Anforderungen an das Bauwerksmonitoring in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Mit der zunehmenden Miniaturisierung eingebetteter Systeme werden auch im Bauwerksmonitoring zunehmend kleine, leistungsfähige Sensoren verfügbar, die über einen großen Bereich des Bauwerks verteilt und zur Messung komplexer physikalischer

[1]Eine Definition der häufig synonym verwendeten Begriffe „Bauwerksmonitoring“ und „Structural Health Monitoring“ erfolgt in Kapitel 2.

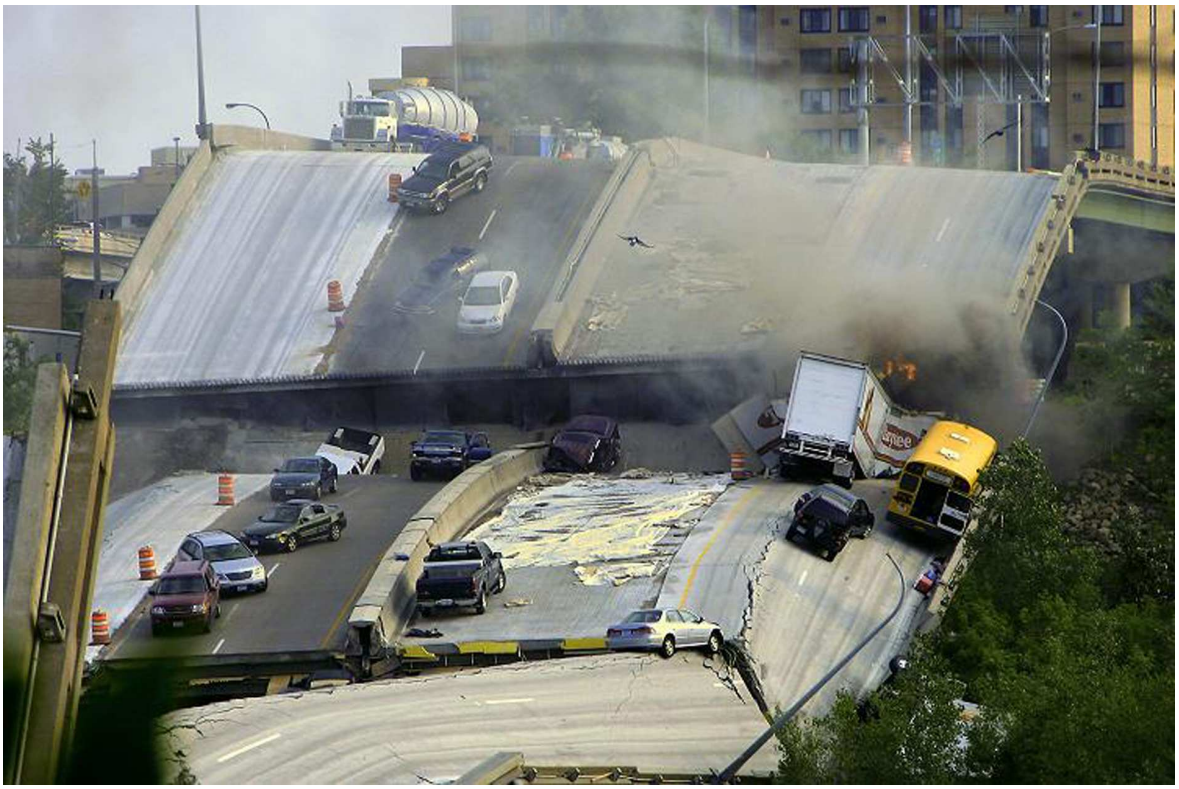


Abbildung 1.2: Kollaps der Interstate 35 W in Minneapolis (Quelle: AP/ Spiegel Online)

Phänomene eingesetzt werden können. Da diese Sensoren in großer Zahl in das Bauwerk eingebracht werden und insbesondere bei der Messung dynamischer Prozesse eine große Datenmenge produzieren, kommt einer automatischen Datenverarbeitung und einer kontinuierlichen, intelligenten Datenreduktion sowie einer computerbasierten Bewertung der Messdaten eine besondere Bedeutung zu.

Die vorliegende Arbeit soll vor diesem Hintergrund einen informatischen Beitrag zum Bauwerksmonitoring leisten. Das Ziel ist es, ein computergestütztes Monitoringsystem zur messtechnischen Dauerüberwachung sicherheitsrelevanter Ingenieurbauwerke zu entwickeln, das alle relevanten Arbeitsschritte von der Messdatenerfassung bis hin zu deren Auswertung computerorientiert abbildet. Auf der Basis einer neuartigen Softwaretechnologie, der Agententechnologie, soll die Softwareunterstützung für die überwiegend verteilt bearbeiteten Arbeitsschritte des Bauwerksmonitorings verbessert werden. Das Bauwerksmonitoringsystem wird hierzu aus mehreren Softwareagenten aufgebaut, die als autonome Softwarekomponenten mit eigenen Zielen, Ressourcen und Fähigkeiten sowie einem (vor-)definierten Verständnis über die Anwendungswelt versehen sind und mit anderen Agenten bzw. menschlichen Auftraggebern interagieren können.

Im Vordergrund der softwaretechnischen Umsetzung steht dabei zunächst die Implementierung eines flexiblen Zugriffs auf die in-situ platzierten Sensoren, um die Voraussetzungen für eine kontinuierliche Messung verschiedenartiger, physikalischer Phänomene zu schaffen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Kommunikation mit der Sensorik auf der Basis einer Vielzahl von Protokollen und Übertragungswegen erfolgen kann. Zur Implementierung eines zukunftsorientierten, offen ausgelegten Bauwerksmonitoringsystems soll das dynamische Auffinden entfernter oder in-situ Sensoren und die Steuerung dieser Sensoren über das Internet ermöglicht werden.

Darauf aufbauend soll die Verwaltung erhobener Messdaten durch eine automatisierte Datenverarbeitung verbessert werden. Das Bauwerksmonitoring ist bisher durch proprietäre Lösungen für die automatisierte Datenerfassung und -speicherung geprägt; diese Lösungen erschweren jedoch aufgrund fehlender Schnittstellen bzw. proprietärer Datenformate eine computergestützte Datenverarbeitung. Um Anwendungen die Verarbeitung entfernt erhobener Messdaten und einen informationsverlustfreien Datenaustausch zu ermöglichen, soll in dieser Arbeit untersucht werden, wie die Struktur und die Semantik von Messdaten für eine computergestützte Verarbeitung generisch beschrieben werden können. Nach der Festlegung eines geeigneten Datenformates sollen dann prototypische Softwarekomponenten zur automatischen Filterung und Verarbeitung von Messdaten implementiert werden.

Das zu entwickelnde Bauwerksmonitoringsystem soll schließlich mit der Fähigkeit ausgestattet werden, selbstständig Diagnosen über den aktuellen Bauwerkszustand durchzuführen. Das Monitoringsystem muss hierzu in der Lage sein, die Reaktion des Bauwerks auf sich ändernde Umgebungs- oder Betriebsbedingungen zu erfassen, um kritische Systemzustände zuverlässig erkennen zu können. Zu diesem Zweck sollen bestehende Methoden bzw. Modelle zur Beschreibung des Bauwerksverhaltens auf der Basis von Messdaten prototypisch in das Bauwerksmonitoringsystem integriert werden.

Als Anwendungsbeispiel für die prototypische Implementierung des Bauwerksmonitoringsystems wird die Überwachung von Talsperren gewählt, da diese aufgrund der gesetzlichen Vorgaben mit Messeinrichtungen zur Erfassung von relevanten Systemparametern ausgestattet sind und viele dieser Messeinrichtungen auch bereits automatisiert sind. Von Vorteil ist zudem, dass langjährige Messreihen von wichtigen Systemparametern vorliegen und praktische Erfahrung in der Auswertung von Messdaten besteht, die zur Verifizierung des Bauwerksmonitoringsystems genutzt werden können.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. In Kapitel 2 und 3 sind die für diese Arbeit relevanten bauingenieurtechnischen und informatischen Grundlagen zusammenfassend dargestellt. Die Kapitel 4 und 5 beschreiben den gewählten Lösungsansatz zur Entwicklung eines Bauwerksmonitoringsystems sowie die softwaretechnische Umsetzung in ein Multiagentensystem.

In Kapitel 2 werden die zur Überwachung von Ingenieurbauwerken durchgeführten technischen Maßnahmen beschrieben. Dabei wird insbesondere auf die Inspektion und Prüfung von Bauwerken sowie neue Ansätze zur Ermittlung quantitativer Informationen über ein Bauwerk wie experimentelle Prüfverfahren oder das Bauwerksmonitoring eingegangen. Daran anknüpfend werden mögliche Strategien für das Bauwerksmonitoring vorgestellt. Ein weiterer Abschnitt dieses Kapitels behandelt die zur messtechnischen Dauerüberwachung von Bauwerksphänomenen eingesetzten Bauwerksmonitoringsysteme und gibt einen Überblick über die Systemarchitektur sowie die Komponenten dieser Systeme.

Das Kapitel 3 erläutert die Grundlagen der Multiagentensystemtechnologie, die als informatischer Lösungsansatz für das vorliegende Überwachungsproblem gewählt wurde. Dabei wird ein Überblick über die wesentlichen Architekturen, Konzepte und Standards im Bereich der Multiagentensysteme gegeben. Ein abschließender Abschnitt behandelt den Entwicklungsstand von Agentensystemen im Bauingenieurwesen.

Das in dieser Arbeit entwickelte Konzept zur messtechnischen Dauerüberwachung von Bauwerken wird in Kapitel 4 vorgestellt. Anhand eines verteilten Monitoringablaufs wird das

vorliegende Monitoringproblem zunächst informatisch analysiert. Darauf aufbauend wird ein agentenorientierter Entwurf für das zu entwickelnde Bauwerksmonitoringsystem erarbeitet, der als Ergebnis eine vollständige Spezifikation aller Agententypen des Bauwerksmonitoringsystems einschließlich ihrer Verantwortlichkeiten und Interaktionen beinhaltet. Der Analyse und dem Entwurf wird die JADE-Methodologie zugrundegelegt.

Die Implementierung des Bauwerksmonitoringsystems wird in Kapitel 5 erläutert. Das Kapitel beschreibt, wie die zuvor spezifizierten Agententypen in Software implementiert werden. Hierzu werden die Agententypen des Bauwerksmonitoringsystems vorgestellt und interessante Aspekte der agentenorientierten Umsetzung dargestellt.

In Kapitel 6 wird die Funktionalität des entwickelten Bauwerksmonitoringsystem anhand von mehreren Anwendungsfällen validiert. Dazu wird das Bauwerksmonitoringsystem auf ein Überwachungsszenario aus der Talsperrenüberwachung angewendet und eine mögliche Verteilung bzw. Konfiguration des Monitoringsystems über mehrere Rechner dargestellt. Die Anwendung des Bauwerksmonitoringsystems wird schließlich anhand von real gemessenen Daten demonstriert.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Kapitel 7, in der die wichtigsten Ergebnisse resümiert und ein Ausblick auf die weitere Forschungsarbeit gegeben wird.

Kapitel 2

Stand der Forschung

Dieses Kapitel stellt den Stand der Forschung auf den Gebieten Bauwerksüberwachung sowie messtechnische Dauerüberwachung von Bauwerken dar. Hierzu wird zunächst in die Thematik der Bauwerksüberwachung eingeführt und die in der Praxis zur Zustandserfassung und -überwachung an Bauwerken eingesetzten Verfahren beschrieben. Danach wird die messtechnische Dauerüberwachung von Bauwerken, das Bauwerksmonitoring, erläutert und Beispielanwendungen des Monitorings genannt. Darauf aufbauend wird der Aufbau existierender Bauwerksmonitoringsysteme anhand der verwendeten Systemkomponenten beschrieben. Abschließend wird ein kurzer Überblick über die Talsperrenüberwachung, da diese in der vorliegenden Arbeit als Anwendungsbeispiel dient.

2.1 Bauwerksüberwachung

Die Bauwerksüberwachung ist eine Ingenieuraufgabe, deren Haupteinsatzbereich sich aus der Alterung der gebauten Infrastruktur und den steigenden Anforderungen an die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Bauwerke ergibt [Wikipedia 08, „Bauwerksüberwachung“]. Die technische und wirtschaftliche Bedeutung der Bauwerksüberwachung kann hierbei vor allem an dem zu erhaltenden Bauwerksbestand der Verkehrsinfrastruktur abgelesen werden: In Deutschland sind zur Zeit über 36.000 Brücken im Bundesfernstraßennetz mit einem geschätzten Wert von rund 40 Mrd. Euro [Metzler 04] zu erhalten, die zu einem beträchtlichen Teil aus den 1960er und 1970er Jahren stammen. Neben anderen Faktoren wie einer unzureichenden Bauwerksunterhaltung, wandelnden Ansprüchen an den Standard sowie geänderten Nutzungsanforderungen verursacht insbesondere die Alterung des Bauwerksbestandes enorme jährliche Instandhaltungskosten und sorgt so dafür, dass sich die finanziellen Aufwendungen zunehmend von den Neubau- hin zu den Erneuerungs- und Erhaltungsinvestitionen verschieben [Santa 05].

Die Alterung der Bauwerke ist ein dauerhafter Prozess, der vorrangig durch Lasteinwirkungen und Umgebungseinflüsse auf das Bauwerk angetrieben wird. Dies hat zur Folge, dass die Bauwerkstragfähigkeit über die Bauwerkslebensdauer abnimmt. Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft den Alterungsprozess eines Bauwerks und den Einfluss der verschiedenen Instandsetzungsstrategien auf die Bauwerkstragfähigkeit. Es ist zu erkennen, dass die Bauwerkstragfähigkeit durch die gezielte Instandsetzung positiv beeinflusst und die Lebensdauer eines Bauwerks verlängert werden kann. Für die Bauwerksbetreiber gilt es deshalb, die Bauwerkstragfähigkeit durch die optimierte, zustandsorientierte Bauwerksinstandsetzung möglichst lange zu erhalten und die häufig nur in beschränktem Umfang zur Verfügung stehenden Mittel möglichst opti-

mal einzusetzen. Die Auswahl und zeitliche Planung einer geeigneten Instandsetzungsstrategie kann hierbei als eine Optimierungsaufgabe mit technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen angesehen werden [Frangopol 01], die nur dann sinnvoll gelöst werden kann, wenn der aktuelle Bauwerkszustand genau bekannt ist.

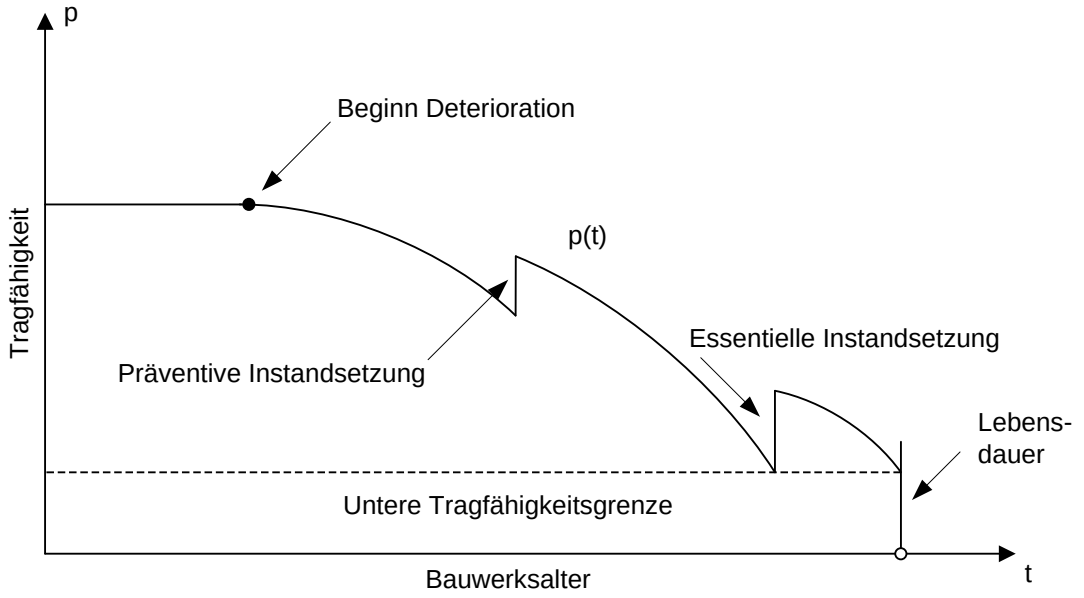


Abbildung 2.1: Degradation der Tragfähigkeit während der Bauwerkslebensdauer nach Frangopol [Frangopol 01]

Vor diesem Hintergrund wird die Bauwerksüberwachung als eine Ingenieuraufgabe definiert, die vor allem auch der Ermittlung genauer Bauzustandsdaten dient. Folgende Einzelziele werden verfolgt:

- Erfassung des allgemeinen Bauwerkszustands hinsichtlich Material- und Bauteilzustand, Schädigungen und Reparaturbedarf,
- Schadensprävention,
- Reduzierung der Unterhaltungs- und Sanierungskosten.

Die Bauwerksüberwachung wird in der Praxis überwiegend in Form von regelmäßigen Inspektionen und Prüfungen durchgeführt. Zur Objektivierung der qualitativen Inspektionen kommen eine Vielzahl messtechnischer Verfahren und neuerdings auch Langzeitüberwachungen auf der Basis messtechnischer Verfahren zur Anwendung. Die folgenden Unterabschnitte geben einen Überblick über die verschiedenen Ansätze zur Zustandserfassung und -überwachung an Bauwerken.

2.1.1 Inspektion und Prüfung von Bauwerken

Sicherheitsrelevante Ingenieurbauwerke müssen auf der Basis der geltenden Normen und Prüfvorschriften laufend oder in regelmäßigen Abständen überwacht werden. Die Normen legen dabei den Ablauf und die Organisation der Überwachung genau fest. Beispiele für baupraktisch angewendete Normen sind die Norm DIN 19700 (2004) „Stauanlagen“ [DIN 19700 04],

die Norm DIN 1076 (1999) „Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung“ [DIN 1076 99] oder die Ausführungsrichtlinie RI-EBW-PRÜF (2007) „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Bauwerksprüfungen nach DIN 1076“ [RI-EBW-PRÜF 07]. Die den Normen zugrunde liegende Sicherheitsphilosophie ist hierbei inspektionsbasiert, d.h. sie beruht auf regelmäßigen Inspektionen und Prüfungen, die der Ermittlung, Sammlung und Zusammenstellung von Bauzustandsdaten dienen und die nach ihrem Zweck zeitlich gestaffelt sind (vgl. hierzu auch Abb. 1.1).

Die Feststellung der Schäden und Zustandsveränderungen erfolgt dabei im Rahmen der regelmäßigen Bauwerksinspektionen. Die Inspektionen beschränken sich auf die Beobachtung der zugänglichen Bereichen des Bauwerks und die Protokollierung offensichtlicher Deteriorationsfolgen wie Risse, Feuchtstellen oder Abplatzungen am Beton. Bei besonders sicherheitskritischen Bauwerken wie z.B. Talsperren wird die Beobachtung durch die (automatisierte) Ablesung fest installierter Messeinrichtungen ergänzt, um das Verhalten des Bauwerks anhand von Messwerten und einfacher Grenzwerte kontinuierlich zu überprüfen.

Eine genauere Schadenserfassung und Zustandsbewertung als in den Inspektionen erfolgt im Rahmen der Bauwerksprüfungen. Hierzu werden die sichtbaren Schadenserscheinungen zunächst visuell oder durch handnahes Prüfen (z.B. Abklopfen) festgestellt. Auf der Basis dieser Ergebnisse erfolgt dann die Ermittlung der Schadensursache, wobei die Bewertung der Schäden vom Bauwerksprüfer durchgeführt wird. Für den zahlenmäßig großen Bestand an Straßenbrücken wurde zur Sicherstellung einer möglichst einheitlichen Vorgehensweise bei der Erfassung und Auswertung von Schäden ein Schadensbewertungskatalog erarbeitet und in die Ausführungsrichtlinie [RI-EBW-PRÜF 07] aufgenommen. Das Ergebnis der Prüfung ist in diesem Fall eine Zustandsnote, die zwischen 1,0 (sehr guter Bauwerkszustand) und 4,0 (ungenügender Bauwerkszustand) liegen kann. Für andere Bauwerksarten, wie Talsperren, ist die Vorgehensweise im Vergleich mit Brückenbauwerken jedoch weniger genau definiert (vgl. [DIN 19700 04]).

2.1.2 Zusätzliche Untersuchungen am Bauwerk

Zur Objektivierung der visuellen Inspektionen sowie zur Ermittlung quantitativer Informationen über die Schadensart, den Schadensumfang und die Schadensursachen müssen bei unklarem Schadensbild, kritisch eingestuften Bauwerksteilen oder dem Verdacht auf visuell nicht erkennbare Schäden zusätzliche Untersuchungen am Bauwerk durchgeführt werden. Zu diesem Zweck kommen überwiegend *experimentelle Prüfverfahren* (vgl. Tab. 2.1) zur Anwendung. Als experimentelle Prüfverfahren werden in dieser Arbeit alle Untersuchungsverfahren am Bauwerk definiert, die *im Sinne einer Inspektion* unter *vergleichbaren Randbedingungen* wiederholt werden können. Die Verfahren liefern eine quantitative Beschreibung des aktuellen Bauwerkszustandes und werden insbesondere zur Bestimmung von Materialkennwerten, des Tragverhaltens sowie zur Ermittlung von Schadensart und -umfang eingesetzt.

Eine besondere Stellung innerhalb dieser Prüfverfahren nehmen die Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (ZfPBau) ein. Insbesondere unter den Gesichtspunkten einer präventiven Schadenserkennung bieten diese Verfahren langfristig hervorragende Möglichkeiten, um mikroskopische Schädigungen bzw. Veränderungen ohne Eingriff in die Bauwerkssubstanz zu bestimmen. Die ZfPBau-Verfahren sind deshalb für das in Abschnitt 2.2 beschriebene Bauwerksmonitoring und Structural Health Monitoring von Interesse, da dort die Zielsetzung besteht, den Messvorgang zu automatisieren, die Messdatenauswertung zu vereinfachen und die verteilt gemessenen Messdaten computerunterstützt zusammenzuführen, um Strukturschädi-

Tabelle 2.1: Übersicht über experimentelle Prüfverfahren [Mehdianpour 04]

Experimentelle Prüfverfahren		
statisch	**dynamisch**	**ZfP**
GPS	Modaltest	Sichtprüfung
Photogrammetrie	– Impact	Ultraschall
Probebelastung	– Harmonisch	– Laufzeit
– Dehnung	– Ambient	– Resonanz
– Spannung	Impedanzverfahren	Radar
– Verschiebung	...	Schallemissionsanalyse
– Verformung		Interferometrie
Einflußlinie		Impact-Echo
...		Magnetische Methoden
		Kernspintomographie
		Zeitbereichreflektometrie
		Optische Verfahren
		Radiographie
		Farbeindringverfahren
		Chemische Sensoren
		...

gungen frühzeitig zu erkennen. Einen ausführlichen Überblick über die ZfP-Verfahren geben die Veröffentlichungen [Maierhofer 03] und [Taffe 03]. Zusätzlich bietet das online abrufbare ZfPBau-Kompendium [Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin 04] eine detaillierte Auflistung der Verfahren mit entsprechender Kurzbeschreibung, Charakterisierung und Bewertungen.

Nachteilig für die baupraktische Anwendung der ZfPBau-Verfahren ist jedoch die große Komplexität der Messverfahren. Die Anwendung der Messverfahren sowie die Auswertung der erfassten Messdaten erfordert Fachwissen aus verschiedenen Disziplinen (insbesondere Baustatik und -dynamik, Messtechnik und Informatik), sodass die Verfahren kaum von einem Fachexperten allein beherrscht werden können. Um den Einsatz der ZfPBau-Verfahren zu erleichtern, existieren heute für viele Bauwerksarten technische Richtlinien, die einen Katalog von Untersuchungs- und Auswertemethoden für gezielte Messaufgaben bereitstellen und auf diese Weise den Einsatz experimenteller Prüfverfahren vereinfachen (z.B. in [Mufti 01]).

2.2 Bauwerksmonitoring

Im Hinblick auf eine präventive Instandsetzungsstrategie und eine frühzeitige Erkennung von vorhandenen Schäden und sich abzeichnenden Degradationsprozessen kommt als Ergänzung zur inspektionsbasierten Bauwerksüberwachung zunehmend die messtechnische Langzeitüberwachung von Bauwerken, das *Bauwerksmonitoring*, zum Einsatz.

2.2.1 Definition

Das Bauwerksmonitoring dient vor allem der *messtechnischen Dauer- oder Langzeiterfassung* aller relevanten Systemparameter eines Bauwerks. Das übergeordnete Ziel ist es, das aktuelle Wissen über das tatsächliche Verhalten von Bauwerken kontinuierlich zu verbessern. Die durch das Monitoring gewonnenen Informationen können hierbei für sehr unterschiedliche Zwecke genutzt werden:

- Zustandsbewertung von Bauwerken,
- Langzeiterfassung der Bauwerkstragfähigkeit,
- Abschätzung der verbleibenden Lebensdauer,
- Modellidentifikation und -korrelation,
- Langzeit-Strukturüberwachung („Structural Health Monitoring“)

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen experimentellen Prüfverfahren werden die relevanten Messgrößen beim Bauwerksmonitoring über einen längeren Zeitraum *kontinuierlich* oder *periodisch* erfasst. Es kommt insbesondere dann zur Anwendung, wenn die *zeitliche Entwicklung* aufgezeichneter Messgrößen beobachtet und/oder alle für das Bauwerk relevanten Ereignisse wie Lasten, Schadensprozesse, chemische Einwirkungen und Umgebungsbedingungen erfasst werden müssen (vgl. Unterabschn. 2.2.4). Die erfassten Messdaten liefern quantitative Entscheidungskriterien und bilden die Basis für die zunehmend wichtigen Simulationsprozesse zur Zukunftsprognose und Zuverlässigkeitsanalyse von Bauwerken. Zusätzlich können aus der Korrelation der verschiedenen, gleichzeitig gemessenen Messgrößen weitere Erkenntnisse über das Bauwerksverhalten gewonnen werden, z.B. indem der zeitliche Verlauf der Messgrößen analysiert wird und mit einem Referenzsystem bzw. -zustand verglichen wird.

Das Bauwerksmonitoring wird häufig als Bestandteil einer ganzheitlichen *Structural Health Monitoring (SHM)*-Strategie angewendet. Die durch die Bauwerksmonitoringssysteme erfassten Messgrößen werden dabei mittels zusätzlicher Software ausgewertet und Schadensdiagnosen erstellt[1]. Das SHM [Adams 07; Balageas 06] wird in dieser Arbeit als eine globale Strategie zur Zustandserfassung und -bewertung von Strukturen definiert, die auf den Einsatz von Sensorik zugeschnitten ist. Charakteristisch für das SHM ist, dass die *Integrität einer Struktur* auf Bauteil- und Systemebene auf der Basis der in situ installierten Sensorik überwacht wird. Hierzu werden fortgeschrittene Schadenserkennungs- und Schadensdiagnosestrategien in SHM-Systeme integriert, die eine *automatisierte Schadensdiagnose* und eine *Vorhersage der verbleibenden Nutzungsdauer* auf der Grundlage von Messdaten ermöglichen (vgl. Unterabschn. 2.2.6 bzw. 2.2.7). SHM-Systeme liefern hierbei auf Anfrage Informationen über jede signifikante Veränderung oder Schaden an einer Struktur [Mufti 01]. Die Anwendungsgebiete des SHM erstrecken sich über das Bauingenieurwesen, den Maschinenbau sowie die Luft- und Raumfahrttechnik.

[1] Der Aufbau von Bauwerksmonitoring- und SHM-Systemen wird in Abschnitt 2.3 erläutert

Das CSHM[2] soll mittelfristig dazu beitragen, die Bauwerksentwürfe effizienter und ökonomischer zu machen und die Tragfähigkeit bestehender Bauwerke besser auszunutzen. Es ist von großer Bedeutung, um innovative Konstruktionen zu überwachen und Daten bereitzustellen, auf deren Grundlage wichtige Änderungen in der Konstruktion ermöglicht werden. Auf dem Forschungsgebiet der intelligenten Materialien/Strukturen (engl. smart materials/structures) wird das SHM gar als eine essentielle Technik betrachtet, um langfristig „intelligente“ Materialien bzw. Bauwerke zu entwickeln, die Lasteinwirkungen selbsttätig erkennen, sich steuern und den neuen Bedingungen aktiv anpassen (vgl. Abb. 2.2).

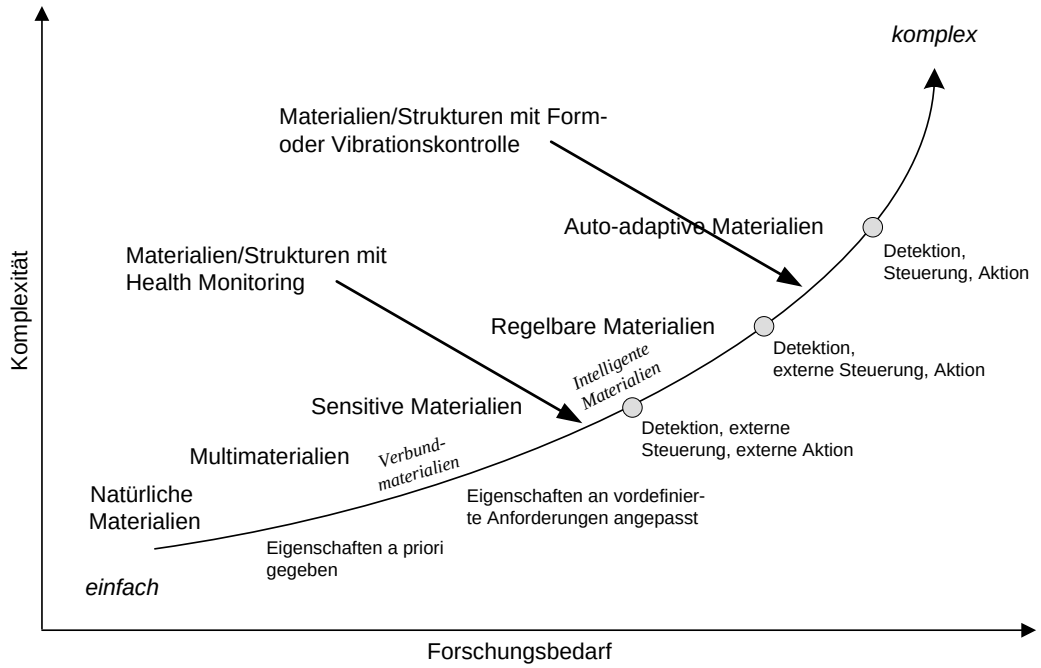


Abbildung 2.2: Anwendung des Structural Health Monitoring in intelligenten Materialien und Strukturen [Balageas 06]

2.2.2 Konzept

Das Konzept des Bauwerksmonitorings beruht auf der systematischen Erfassung aller relevanten Systemparameter. Ein Monitoringkonzept muss deshalb die Festlegung von Dauer und Frequenz der Messungen, das zu überwachende Bauwerk, die zu erfassenden Aktionen und Reaktionen („Phänomene“), die Auswahl geeigneter Messeinrichtungen und das Bauwerksverhalten berücksichtigen. Abbildung 2.3 zeigt die wichtigsten Inhalte für das Monitoringkonzept.

Die Erstellung eines Monitoringkonzeptes erfolgt in mehreren Teilschritten, wobei üblicherweise zunächst die maßgebenden Systemparameter und Einwirkungen auf das Bauwerk (Phänomene) ermittelt werden. Gegebenenfalls werden durch Simulation bzw. analytische Berechnung die Reaktionen des Bauwerks auf die Einwirkungen sowie die Größenordnung der Reaktionen abgeschätzt. Auf der Grundlage dieser Informationen lassen sich dann die zu messenden physikalischen Größen identifizieren und die zu ihrer Messung geeigneten Instru-

[2]Zur Unterscheidung von anderen Anwendungen des SHM wird im folgenden die Abkürzung CSHM (engl.: Civil Structural Health Monitoring) für das SHM an Bauwerken verwendet.

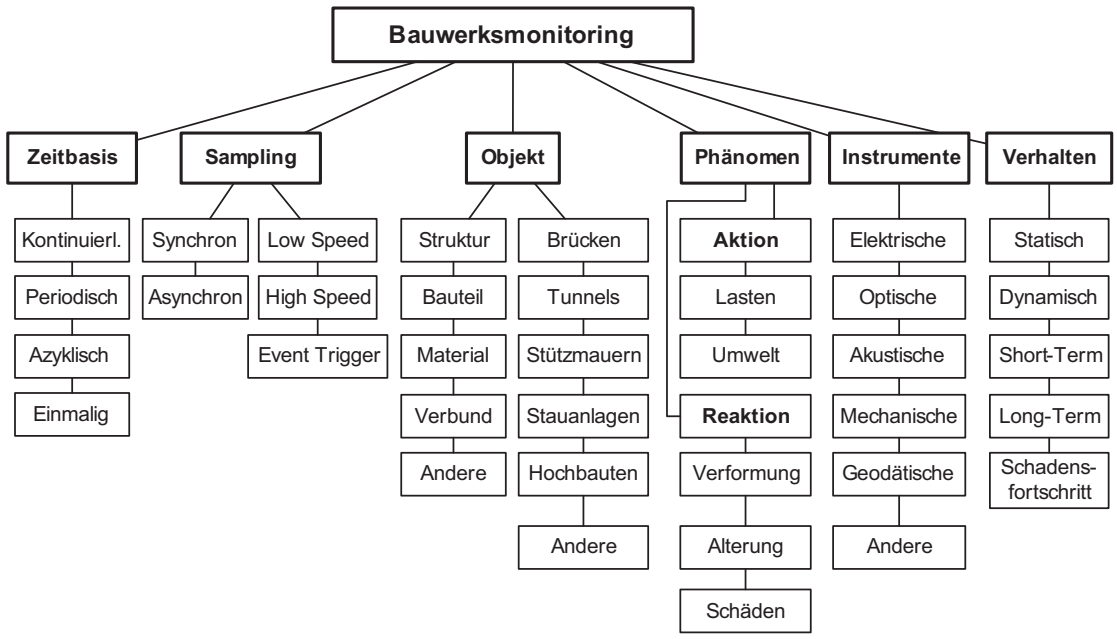


Abbildung 2.3: Wichtige Inhalte für ein Monitoringkonzept nach Santa [Santa 05]

mente eingrenzen [Santa 05]. In einem ganzheitlichen Monitoringkonzept sind schließlich auch Strategien zur Schadenserkennung und Bewertung der Bauwerkssicherheit zu entwerfen.

2.2.3 Dauer und Frequenz von Messungen

Ein wichtiger Teil des Konzepts ist zunächst die Festlegung der Dauer und der Frequenz von Messungen, der sog. Messstrategie. Die Messstrategien können dabei hinsichtlich der Überwachungsdauer in die (i) Kurzzeit- und (ii) Langzeitüberwachung unterteilt werden. Die Auswahl einer Messstrategie richtet sich primär nach den zu erfassenden Bauwerksphänomenen.

Die *Kurzzeitüberwachung* ist eine Messstrategie, um den Zustand eines Bauwerks zu einem bestimmten Zeitpunkt zu untersuchen. Die Kurzzeitüberwachung kommt üblicherweise dann zur Anwendung, wenn die Sicherheit des Bauwerks entweder aufgrund eines entdeckten Mangels bzw. Schadens am Bauwerk oder durch Änderungen (Änderung der Verkehrslasten, Änderungen am Tragsystem, Ertüchtigung des Bauwerks, usw.) beurteilt werden muss. Gegenüber der visuellen Inspektion werden durch die Kurzzeitüberwachung zusätzliche, qualitative Informationen ermittelt, auf deren Basis die Bauwerkssicherheit geprüft werden kann. Es kommen vorwiegend die in Unterabschnitt 2.1.2 beschriebenen experimentellen Prüfverfahren zum Einsatz. Wenn mehrere Kurzzeitüberwachungen regelmäßig über einen längeren Zeitraum wiederholt werden, werden diese als periodische Langzeitüberwachung definiert.

Die kontinuierliche Überwachung eines Bauwerks wird als *Langzeitüberwachung* definiert, wenn die Überwachung über einen Zeitraum von Jahren bis Jahrzehnten durchgeführt wird (vgl. [ISIS 08]). Die Langzeitüberwachung kommt insbesondere dann zur Anwendung, wenn sich die Lasteinwirkungen nur langsam ändern wie bei langsamen (graduellen) Temperaturänderungen oder die Belastungen nicht vorhersagbar sind, z.B. bei Naturkatastrophen wie Hochwasser oder Erdbeben. Darüber hinaus kommt die Langzeitüberwachung auch zur Anwendung, wenn ein Bauwerk durch einen langsamen Degradationsprozessen beeinträchtigt

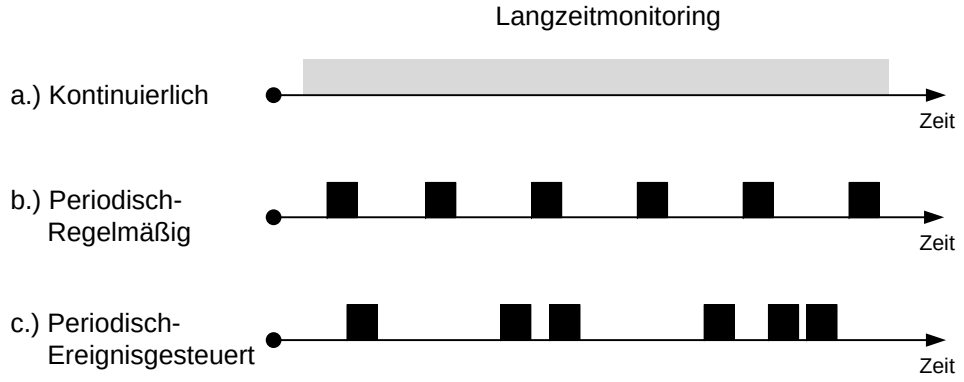


Abbildung 2.4: Messstrategien für das Langzeitmonitoring

wird und Instandsetzungsmaßnahmen entweder nur begrenzt möglich sind oder so lange wie möglich verschoben werden sollen. Dies ist insbesondere bei der Überwachung von alten Bauwerken und Denkmälern der Fall. Für diese Bauwerke ist das Bauwerksmonitoring in Verbindung mit der zerstörungsfreien Prüfung die einzige Möglichkeit, um den genauen Zustand des Bauwerks zu ermitteln, da kein Material zur Bestimmung von Materialeigenschaften entnommen und geprüft werden kann.

Bei der Durchführung einer Langzeitüberwachung kann die Erfassung von Messdaten entweder kontinuierlich oder periodisch erfolgen. Zu unterscheiden sind eine kontinuierliche, eine periodisch-regelmäßige und eine periodisch-ereignisgesteuerte („getriggerte“) Datenerfassung (vgl. Abb. 2.4). In einer periodisch-regelmäßigen Datenerfassung werden die Messungen in festen Zeitabständen durchgeführt, während in einer periodisch-ereignisgesteuerten Datenerfassung die Messungen durch ein bestimmtes Ereignis wie das Überschreiten eines Schwellenwertes ausgelöst bzw. getriggert werden. Das Abtastintervall („Sampling“) für jede Datenerfassung hängt dabei von den dynamischen Eigenschaften des beobachteten Bauwerks ab.

Typische Anwendungen für die periodisch-regelmäßige Datenerfassung sind Fälle, in denen die Lasten statisch bzw. quasi-statisch sind und sich die beobachtete Bauwerkseigenschaft langsam ändert. Ein Beispiel hierfür ist die Messung des jährlichen Temperatureinflusses auf eine Staumauer. Eine typische Anwendung für die periodisch-ereignisgesteuerte Datenerfassung ist die Messung von Fahrzeugüberfahrten über eine Brücke. Hier sind nur die Messungen interessant, bei denen sich das Fahrzeug auf der Brücke befindet. Eine kontinuierliche Datenerfassung wird dagegen immer dann genutzt, wenn schnelle Änderungen der Phänomene aufgrund zufälliger (stochastischer) Ereignisse erwartet werden. In diesem Fall müssen die Datenströme in geeigneter Weise verarbeitet werden, um die entstehende Datenmenge zu verringern.

2.2.4 Messgrößen

Die Hauptaufgabe des Bauwerksmonitorings ist es, den Verlauf der relevanten Messgrößen[3] bzw. Systemparameter zu erfassen. Durch das Bauwerksmonitoring werden hierbei sowohl die

[3]Häufig findet sich in der Literatur auch der Begriff Phänomen (vgl. hierzu auch Abb. 2.3). Beide Begriffe werden im Folgenden synonym verwendet.

Einwirkungen auf das Bauwerk, wie Lasten oder Umwelteinflüsse, als auch die Reaktionen des Bauwerks (Tragwerksantworten) auf diese Einwirkungen erfasst. Wichtige Messgrößen sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

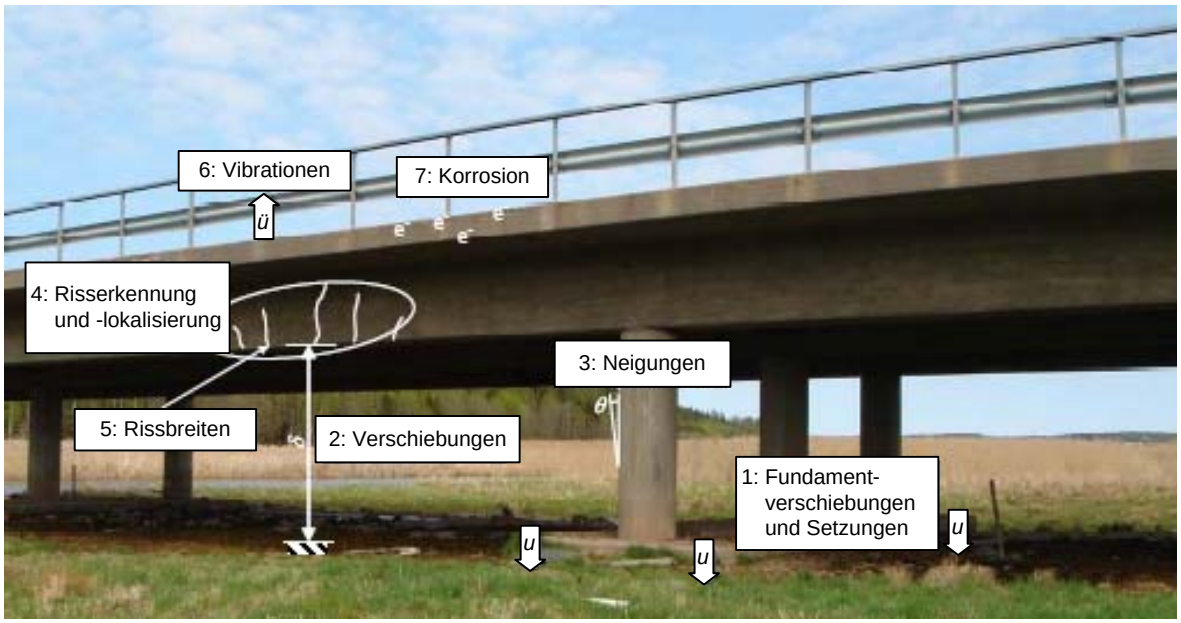


Abbildung 2.5: Übliche Messgrößen [Hejll 07]

Beispiele für zu erfassende Messgrößen sind Kräfte, Spannungen, Verschiebungen, Verdrehungen, Vibrationen und Dehnungen. Daneben werden häufig auch weitere, das Bauwerksverhalten beeinflussende Größen wie Belastung, Temperatur, Feuchte oder Wind gemessen.

2.2.5 Messeinrichtungen

Als Messeinrichtung wird nach [Hariri 04] die Gesamtheit der zur Feststellung einer Messgröße erforderlichen Elemente (Fühler bzw. Sensor zur Erfassung der Messgröße, Rechen- und Steuergeräte, Verstärker, Regler, Ausgabegeräte, usw.) definiert. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über Sensoren gegeben, in Abschnitt 2.3 werden dann computergestützte Datenerfassungssysteme erläutert.

Im Bauwerksmonitoring werden vorwiegend Sensoren zur Messung von Kraft, Dehnung, Verschiebung oder Neigung verwendet. Verbreitet sind zudem Sensoren zur Messung von Einflüssen wie Temperatur, Feuchte, Wind, Setzungen oder Niederschlag, die zur Interpretation des Bauwerksverhaltens benötigt werden. Entscheidend bei der Auswahl von Sensoren für das Bauwerksmonitoring ist die Applizierbarkeit der Sensoren (z.B. Einbetonierung, Robustheit, etc.), da es zur Messung von Bauwerksphänomenen häufig erforderlich ist, die notwendigen Sensoren am Bauwerk fest anzubringen. Für viele Bauwerksphänomene sind heute einbetonierbare Sensoren verfügbar, die die Eignung von Messverfahren für die messtechnische Dauerüberwachung erhöhen bzw. herstellen. Weiterhin ist die Abstimmung auf die verwendete Datenerfassungshardware [Santa 05] wichtig. Einen groben Überblick über die heute für das Bauwerksmonitoring verfügbaren Sensoren gibt Tabelle 2.2.

Zum Einsatz kommen heute neben konventionellen elektrischen Sensoren zunehmend auch piezo-elektrische, elektro-rheologische und optische Sensoren auf Glasfaserbasis sowie Mikrosysteme, so genannte mikroelektromechanische Systeme (engl. Micro-Electro-Mechanical-

Tabelle 2.2: Sensoren für das Bauwerksmonitoring [Wikipedia 08]

Messgröße	Sensor
Entfernung	Absolutwertgeber Inkrementalgeber Seilzuglängengeber Ultraschallsensor
Beschleunigung	Quartz-Accelerometer Piezo-elektrischer Sensor Mikrosysteme (MEMS)
Dehnung	Dehnungsmessstreifen (DMS) – mit Folien – mit Draht Halbleiter-Dehnungsmessstreifen Schwingsaitenaufnehmer
Druck	Differenzdrucksensor Silizium-Drucksensor Keramischer Drucksensor Barometer (Luftdruckmessgerät)
Feuchte	Coulometrischer Feuchtesensor für Luftfeuchtigkeit Hygrometer für Luftfeuchtigkeit Tensiometer für Bodenfeuchtigkeit
Kraftsensor	Federkörper-Kraftaufnehmer Piezo-elektrischer Sensor
Temperatur	Bimetallthermometer Pyroelektrischer Sensor (Pyrometer) Thermoelement Widerstandsthermometer – Heißleiter (NTC) – Kaltleiter (PTC) – PT100

System, MEMS) [Wikipedia 08, „MEMS“], die ursprünglich für die Kommunikations- oder Mikrosystemtechnik entwickelt wurden. Moderne, intelligente Sensoren (engl. smart sensors) [Wikipedia 08, „Smart-Sensor“] verfügen dabei zumeist auch über eine eigene Auswerteelektronik, besitzen also spezielle Prozessoren oder Controller zur Signalaufbereitung und Signalverarbeitung vor Ort.

2.2.6 Zustandserfassungsstrategie

Die im Bauwerksmonitoring zur Erfassung des Bauwerkszustandes angewendeten Strategien lassen sich in (i) lokale und (ii) globale Strategien unterteilen. Die *lokale Überwachung* wird dabei vorwiegend zur Beobachtung eines lokal auftretenden Bauwerksphänomenen wie z.B. lokaler Beanspruchungen oder Dehnungen oder des Rissfortschritts angewendet. Da bei der lokalen Überwachung die Erfassung der Messgrößen häufig periodisch-regelmäßig erfolgt, kommen verstärkt die Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung zur Anwendung. Die überwiegend (noch) nicht automatisierten bzw. nicht automatisiert auswertbaren ZfP-Verfahren werden dann von den Monitoringbeteiligten manuell ausgewertet.

Globale Bauwerksphänomene wie Deformationen oder Vibrationen eines Bauwerks werden dagegen durch die *globale Überwachung* erfasst. Hierzu werden bevorzugt rechnergesteuerte, automatisierte Messverfahren genutzt, da die Datenerfassung an mehreren Messpunkten synchron erfolgen. Die Messpunkte werden zumeist in einem definierten Raster an signifikanten Punkten platziert oder dort positioniert, wo hohe Beanspruchungen erwartet werden oder Schadens- bzw. Verhaltensprozesse gut beobachtet werden können [Santa 05]. Die optimale Platzierung von Sensoren (engl. sensor placement) ist mittlerweile zu einem eigenen Forschungsgebiet geworden, da die richtige Platzierung der Sensoren für die Leistungsfähigkeit und die Kosten des Bauwerksmonitorings bestimmend ist (siehe hierzu z.B. [Nguyen 07; Padula 99]).

2.2.7 Schadenserkennungsstrategie

Zur Schadenserkennung werden entweder strukturmechanische Modelle angepasst oder statistische Verfahren angewendet. Die strukturmechanischen Modelle bilden die Basis für eine physikalisch untermauerte Simulation und Analyse des Bauwerksverhaltens. Bisher überwiegt die Auswertung von dynamischen Bauwerksparametern mittels schwingungsbasierter Verfahren und Modalanalysen unter Nutzung der strukturmechanischen Modelle [Rytter 93; Müller-Slany 03; Waller 89]. Die Grundidee besteht darin, dass die dynamischen Bauwerksparameter wie Frequenzen, Eigenschwingformen und modale Dämpfung auf den physikalischen Eigenschaften des Gesamtbauwerks wie Masse, Dämpfung und Steifigkeit basieren. Wenn das Bauwerk einer Schädigung ausgesetzt ist, verändern sich die korrespondierenden modalen Eigenschaften. Im CSHM hat sich eine von Rytter [Rytter 93] vorgestellte Methodik zur Schadenserkennung als Standard etabliert. Die Schadenserkennung läuft dabei in fünf Schritten ab:

1. Ermittlung, dass ein Schaden vorhanden ist (Existenz)
2. Ermittlung der geometrischen Lage/Position des Schadens (Ort)
3. Bestimmung der Art des Schadens (Art)
4. Quantifizierung der Schwere des Schadens (Umfang)
5. Vohersage der verbleibenden Lebensdauer[4] (Prognose)

Mittlerweile ist leistungsfähige, kommerzielle Software zur computerbasierten Schadenserkennung verfügbar. Beispiele sind die Softwarepakete STAR Modal [Spectral Dynamics, Inc. 09] und ARTEMIS [Structural Vibration Solutions A/S 09], die eine modale Analyse im Zeit- und Frequenzbereich ermöglichen. Die Integration in Bauwerksmonitoringsysteme beruht überwiegend auf der Übergabe bzw. dem Export der erfassten Messdaten an die Schadenserkennungssoftware.

In letzter Zeit werden zunehmend auch sog. modellfreie (engl. model-free), symptombasierte Verfahren zur Schadenserkennung eingesetzt, die auf statistischen Ansätzen beruhen. Das Ziel ist es hierbei, signifikante Veränderungen in den Messschrieben, die auf eine Schädigung des Bauwerks schließen lassen, auf der Basis statistischer Verfahren zu erkennen. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass die entwickelten Verfahren auf andere Bauwerke übertragbar sind, und der Aufwand für die Erstellung und Kalibrierung strukturmechanischer Modelle entfällt. Die

[4]Eine Prognose wird häufig jedoch nicht in die Schadenserkennung eingeschlossen, da die Vorhersage der Restlebensdauer in Abhängigkeit von der Schadensart spezifische Bewertungsmethoden aus der Bruchmechanik oder Ermüdungsanalysen erfordert.

Verfahren, darunter z.B. multivariate Methoden, Wavelets oder autoregressive Modelle, stammen vorwiegend aus der Statistik und der Signalverarbeitung und werden auf die dynamischen Bauwerksparameter angewendet. Beispiele finden sich in [Farrar 99; Farrar 00; Sohn 01] oder [Lei 03].

In neueren Ansätzen werden modellfreie Verfahren verstärkt auf statische Bauwerksparameter wie Verformungen und Spannungen angewendet, um Schäden zu erkennen. In der Doktorarbeit [Lanata 05] wird z.B. ein sehr interessanter, auf der Hauptkomponentenanalyse beruhender Ansatz zur Identifikation anormaler Daten angewendet. Seit langem angewendet werden modellfreie Verfahren in der Talsperrenüberwachung (z.B. in [Ferry 58; Willm 67] oder in abgewandelter Form in [Horlacher 02]), seit kurzem aber auch in der Überwachung von Brückenbauwerken [Lanata 05].

Einen alternativen, sehr aktuellen Ansatz zur automatisierten Schadenserkennung an Bauwerken stellt die Anwendung von Data-Mining-Techniken [Witten 99] auf dynamische sowie statische Bauwerksparameter dar. Das Data Mining wurde in anderen Bereichen, insbesondere im Banken- und Wirtschaftssektor, bereits erfolgreich zur Extraktion von Mustern und Wissen aus Massendaten eingesetzt. Die Anwendung des Data Mining wird deshalb gegenwärtig auch im Bauingenieurwesen untersucht. In [Meyer 07] wird z.B. ein Clustering-Algorithmus zur Analyse von Messdaten (Klassifikation von Messwerten aus der Schallemissionsanalyse) in einem drahtlosen Sensornetzwerk verwendet.

2.2.8 Bewertung der Bauwerkssicherheit

Unter Berücksichtigung der oben erläuterten Einzelstrategien ist ein Bauwerksmonitoringsystem schließlich auf die zur Sicherheitsbewertung des Bauwerks angewendeten Verfahren und Modelle abzustimmen. Insbesondere die für Zuverlässigkeitsanalysen, Sicherheitsnachweise und Lebensdauerabschätzungen verwendeten Modelle können großen Einfluss auf die Auswahl der zu erfassenden Bauwerksphänomene haben. Nach [SAMCO 08] können sechs Bewertungsstufen unterschieden werden (vgl. Abb. 2.6):

Stufe 0: Qualitative (Informelle) Bewertung. Die qualitative Bewertung basiert auf der visuellen Inspektion der Bauwerke, wobei die sichtbaren Deteriorationsfolgen wie z.B. die Korrosion von Stahlbauteilen oder andere sichtbare Schadenshinweise (z.B. Risse oder Abplatzungen) analysiert werden. Die qualitative Bewertung kommt größtenteils in der Infrastrukturverwaltung (Bauwerksmanagement) zur Anwendung, wo der Bauwerkszustand durch visuelle Inspektionen (vor-)beurteilt wird.

Stufe 1: Messwertbasierte Bewertung. Die messwertbasierte Bewertung umfasst alle Verfahren, bei denen die Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks direkt durch Messungen (Monitoring oder Belastungstests) bestimmt wird. Die Untersuchung erfolgt in zwei Schritten, wobei zunächst die Einwirkungen und das Bauwerksverhalten gemessen werden und danach die Gebrauchstauglichkeit anhand von Grenzwerten (aus Entwurfsrichtlinien, Normen) verifiziert wird. Die wichtigste Messgröße zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit ist die Verformung des Bauwerks. Die Verfahren zur messwertbasierten Bewertung sind nur in den Grenzen der Gebrauchstauglichkeit anwendbar.

Stufe 2 – 5: Modellbasierte Bewertung. Die Verfahren zur modellbasierten Beurteilung von Bauwerken verwenden strukturmechanische Modelle zur numerischen Simulation des Bauwerksverhaltens. Die Verfahren berücksichtigen bei der Struktur- und Lebensdaueranalyse von Bauwerken zunehmend Aspekte der Zuverlässigkeit, wobei die Berechnung je nach Stufe mit Methoden steigender Genauigkeit erfolgen kann (vgl. Abb.

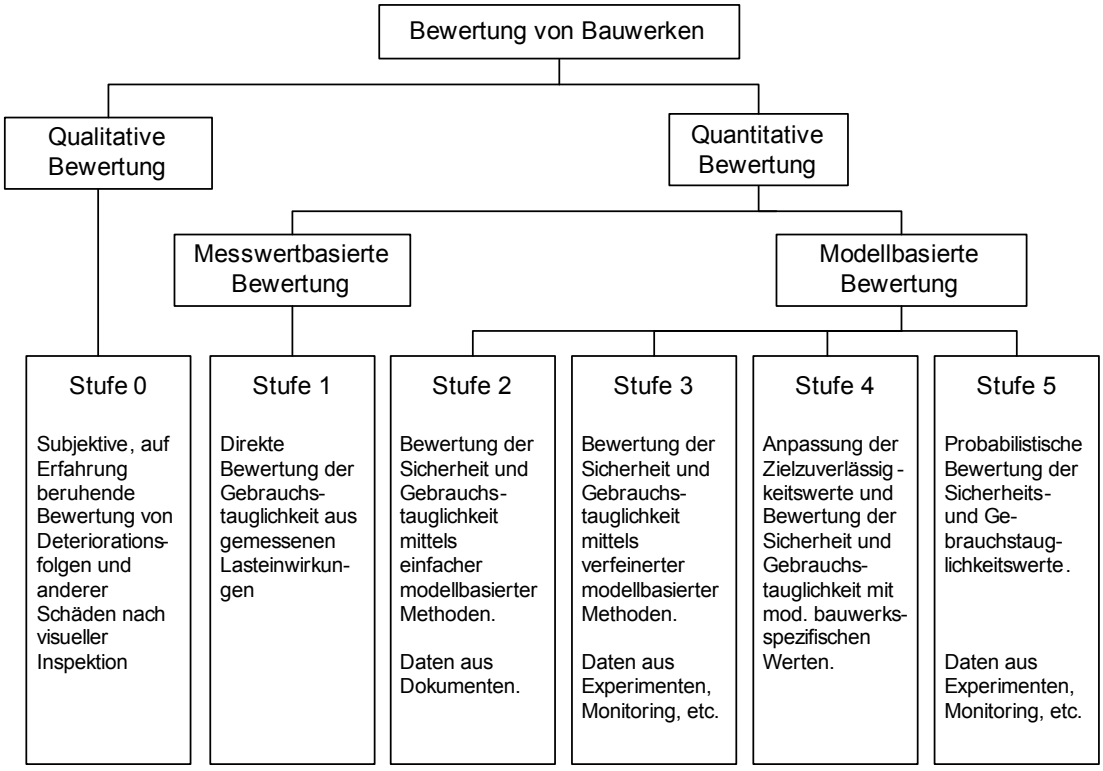

Bewertung von Bauwerken
Qualitative Bewertung
Quantitative Bewertung
Messwertbasierte Bewertung
Modellbasierte Bewertung
Stufe 0
Subjektive, auf Erfahrung beruhende Bewertung von Deteriorations-folgen und anderer Schäden nach visueller Inspektion
Stufe 1
Direkte Bewertung der Gebrauchs-tauglichkeit aus gemessenen Lasteinwirkun-gen
Stufe 2
Bewertung der Sicherheit und Gebrauchs-tauglichkeit mittels einfacher modellbasierter Methoden.
Daten aus Dokumenten.
Stufe 3
Bewertung der Sicherheit und Gebrauchs-tauglichkeit mittels verfeinerter modellbasierter Methoden.
Daten aus Experimenten, Monitoring, etc.
Stufe 4
Anpassung der Zielzuverlässig-keitswerte und Bewertung der Sicherheit und Gebrauchs-tauglichkeit mit mod. bauwerks-spezifischen Werten.
Stufe 5
Probabilistische Bewertung der Sicherheits- und Ge-brauchstaug-lichkeitswerte.
Daten aus Experimenten, Monitoring, etc.

Abbildung 2.6: Verfahren zur Bewertung der Bauwerkssicherheit [Rücker 06]

2.6). Die auf den einzelnen Stufen verwendeten Methoden reichen von vereinfachenden, auf Teilsicherheitsbeiwerten basierenden Methoden bis hin zu voll probabilistischen Methoden. Beispiele für modellbasierte Verfahren finden sich z.B. in [Mufti 01] oder [Rücker 06]. Die modellbasierte Beurteilung ist in Abhängigkeit von der Genauigkeit mit z.T. beträchtlichem Modellierungs- und Berechnungsaufwand verbunden und setzt die genaue Ermittlung von Informationen über das Bauwerk voraus. Zur Ermittlung dieser Informationen kommen experimentelle Prüfverfahren und ein Monitoring zur Anwendung.

Da die Strategien zur Sicherheitsbewertung von Bauwerken nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen, wird der Leser auf weiterführende Literatur zu dieser Thematik, z.B. in [Hejll 07], [Frangopol 01] oder [Schüeller 97], verwiesen. Weitere Literatur zur Thematik findet sich auch im Abschlussbericht [Stangenberg 09] des kürzlich abgeschlossenen Sonderforschungsbereich 398 „Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte unter Schädigungs- und Deteriorationsaspekten“ [Sonderforschungsbereich 398 08], dessen Schwerpunkt die Lebensdauerorientierung war. Unter anderem wurde dort in der Doktorarbeit [Wellmann-Jelic 07] ein Konzept zur effizienten, parallelisierten Simulation von zeitabhängigen Zuverlässigkeitsanalysen entwickelt.

2.2.9 Beispielanwendungen

Das Bauwerksmonitoring wird weltweit an einer zunehmenden Zahl von Bauwerken durchgeführt. Um einen Überblick über aktuelle Bauwerksmonitoringsmaßnahmen zu geben, sind in Tabelle 2.3 vier repräsentative Bauwerke einschließlich der installierten Bauwerksmonitoring-

bzw. CSHM-Systeme dargestellt. Die ausgewählten Beispiele verdeutlichen, dass Bauwerksmonitoring und CSHM mit jeweils unterschiedlichen Zielsetzungen und Aufwand durchgeführt wird. Insbesondere in Asien (vgl. Ting Kau- und Tsing Ma-Brücke) werden die Neubauwerke zunehmend schon während des Baus mit einer großen Anzahl von Sensoren ausgestattet, die den Bauwerksbetreiber online über den aktuellen Bauwerkszustand informieren. Dort erfüllen die Bauwerksmonitoringsysteme aufgrund der extremen Umweltbedingungen (hohe Windgeschwindigkeiten durch Taifune, Starkregen und Erdbebengefährdung) die Funktion von Frühwarnsystemen und werden im Sinne eines Leitsystems zur Steuerung des Strassen- und Eisenbahnverkehrs über die Brücke genutzt.

Für die derzeit in Bau befindliche Nord-Süd-Linie der Amsterdamer U-Bahn wurde ein Monitoringsystem installiert, das dazu beiträgt, Schäden an den größtenteils historischen Bauwerken zu minimieren und katastrophale Schadensfälle mit Gefahr für das menschliche Leben zu vermeiden. Das Monitoring erfolgt hierbei mit einer großen Anzahl von überwiegend geodätischen Sensoren, die ein Lagebild der vortriebsbedingten Setzungen bzw. Hebungen ermöglichen. Insgesamt werden mit rund 5500 Sensoren ca. 1200 Bauwerke durch das Monitoringsystem erfasst und die Informationen zentral in einem geografischen Informationssystem aufbereitet.

Das Beispiel der Ennepetalsperre soll schließlich zeigen, dass auch seit längerem existierende Bauwerke durch ein Monitoring überwacht werden. Hier besteht die Zielsetzung, Schädigungen frühzeitig zu detektieren und somit das Sicherheitsniveau des Bauwerks dauerhauft zu erhalten. Durch die Installation eines Bauwerksmonitoringsystems und die kontinuierliche Erfassung von Porenwasserdrücken in Mauerkern konnte dort u.a. der Erfolg von Sanierungsmaßnahmen belegt werden.

Weitere interessante Beispiele für die Anwendung von Bauwerksmonitoring- und Structural Health Monitoring-Systemen finden sich auf der Webseite der internationalen Gesellschaft für das Structural Health Monitoring intelligenter Infrastruktur (engl.: International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, ISHMII) [ISHMII 08].

Tabelle 2.3: Bauwerke mit installierten Bauwerksmonitoringsystemen

Bauwerk	Ting Kau Brücke	Tsing Ma Brücke	Ennepetalsperre	Metro Amsterdam Linie 52
Jahr	1998	1997	1904	in Bau
Ort	Hong Kong, China	Hong Kong, China	Schwelm, Deutschland	Amsterdam, Niederlande
Länge	1.177 m	2.200 m	657	ca. 9,5 km
Konstruktion	Stahlverbund	Stahlfertigteile	Mauerwerk	Stahlbetonfertigteile
Statisches System	Schrägseilbrücke	Hängebrücke	Schwergewichtsstaumauer	Tunnel
Sensoren	236	> 350	40	> 2400
– Wind	7	6	1	
– Temperatur	83	115	7	
– Beschleun.	45	19	3	
– Druck	88	110		88 (Piezometer)
– Verschieb.	2	2	2	715 (Extensometer)
– Inklinometer			2	1562
– Wiegesystem	6			
– GPS	5	14		
– andere			40 Prismen, Grundwassermessstellen	75 Totalstationen / 5500 Prismen
Datenerfassung	automatisiert	automatisiert	automatisiert	automatisiert
Zweck des Monitorings	Frühwarnystem, Frequenzanalysen	Frühwarnystem, Frequenzanalysen	Überwachung der Standsicherheit	Setzungen, Überwachung der oberird. Bebauung
Software	Eigenentwicklung	Eigenentwicklung, MSC/Patran, MATLAB	Interfels	Geoscope, GIS

2.3 Computerbasierte Systeme für das Bauwerksmonitoring

Zur messtechnischen Langzeitüberwachung von Bauwerken werden — wie bereits im Abschnitt 2.2 beschrieben — zunehmend automatisierte, computergestützte Messsysteme verwendet. In diesem Abschnitt werden der technische Aufbau von computerbasierten Bauwerksmonitoringsystemen (CBMS) und deren informatischen Systemkomponenten erläutert.

2.3.1 Systemarchitektur

Ein computerbasiertes Bauwerksmonitoringsystem (CBMS) besteht üblicherweise aus den folgenden Komponenten:

1. Sensoren
2. Datenerfassungssysteme
3. Datenübertragungs- und Datenspeicherungsmechanismen
4. Datenverwaltung
5. Datenauswertung

Die Erfassung der Messgrößen erfolgt in der Regel durch verteilte *Sensoren*, die an einer Vielzahl von Messstellen, d.h. räumlich relativ weit voneinander entfernt liegen können. Aus diesem Grund kommen vor allem dezentrale, verteilte Datenerfassungsarchitekturen zum Einsatz (s. Abbildung 2.7). Der physikalische Messvorgang wird dabei durch geeignete Sensoren und Messeinrichtungen realisiert, die eine physikalische Eigenschaft in ein elektrisches Signal (z.B. Spannung oder Widerstand) umwandeln. Die Konditionierung und Diskretisierung des Signals erfolgen i. Allg. in der Nähe der analogen Messgeber mittels modularer Datenerfassungssysteme (DAQ-Module), die häufig mit einem eigenen Speicher ausgestattet und über ein Netzwerk miteinander und/oder einem Messrechner verbunden sind. Die Vernetzung der Systemkomponenten basiert auf standardisierten Industrienetzwerktechnologien (z.B. Ethernet[5], Feldbus[6], CAN[7]) und Standardkommunikationsprotokollen (z.B. TCP/IP) [Santa 04; Santa 05].

Die Steuerung des Messvorgangs obliegt in den bestehenden Bauwerksmonitoringsystemen den *Datenerfassungssystemen*, die per Kabel mit den Sensoren des Bauwerksmonitoringsystems verbunden sind. Die Datenerfassungssysteme tasten die Sensoren mit einer vorgegebenen Frequenz ab, wobei die Messungen — je nach Anforderung — kontinuierlich, periodisch oder nach bestimmten Ereignissen ausgelöst werden. Der Messvorgang wird von den Datenerfassungssystemen selbstständig durchgeführt; erfasste Messdaten werden entweder im internen Speicher der Datenerfassungssysteme (z.B. bei Datenloggern) oder auf einem lokalen Messrechner abgelegt. Die Ablage erfolgt überwiegend in einfach strukturierten („flachen“) Dateien mit einem herstellerabhängigen Dateiformat.

Nach der Erfassung werden die Messdaten durch geeignete *Datenübertragungsmechanismen* auf einen Mess- oder lokalen Rechner übertragen und gespeichert. Die Bauwerksmonitoringsysteme verfügen hierzu über spezielle Software, die die Messdaten — wiederum entweder periodisch oder nach besonderen vordefinierten Ereignissen — aus dem Gerätespeicher oder

[5] Standard-Datennetztechnik für die Kommunikation in lokalen Datennetzen (LANs)
[6] digitale Übertragungstechnik zur Verbindung von Sensoren und Aktoren mit Steuergeräten
[7] engl.: Controller Area Network, Netzwerkprotokoll und Bus-Standard zur Vernetzung von Steuergeräten

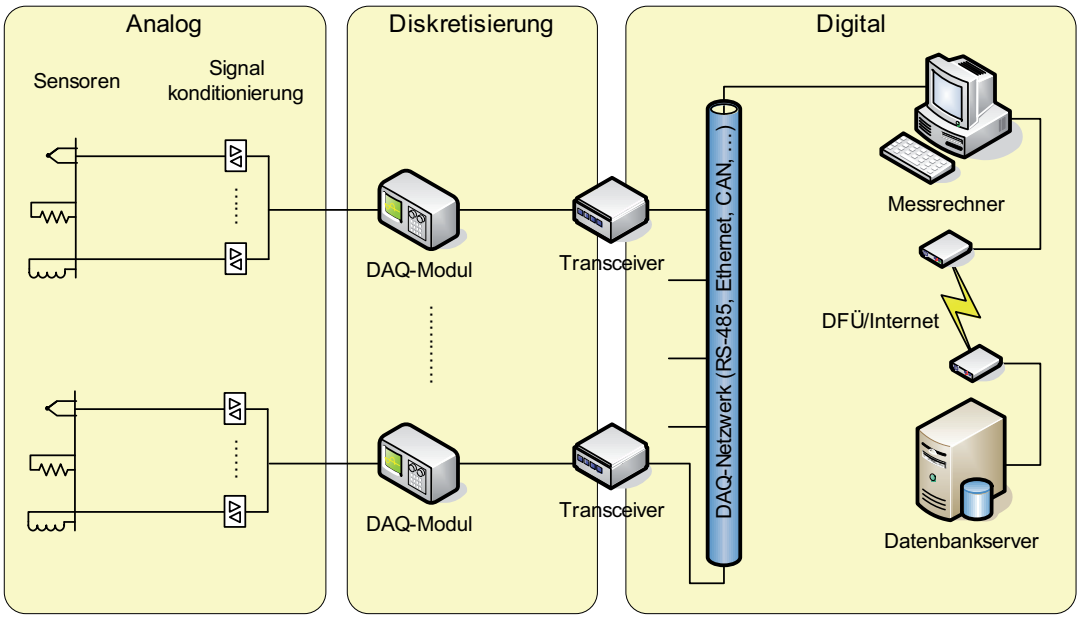


Abbildung 2.7: Verteilte dezentrale Datenerfassungsarchitektur eines Bauwerksmonitoringsystems [Santa 05]

den Dateien ausliest, umwandelt und auf einem lokalen Messrechner in einem Zieldateiformat abspeichert.

Die *Verwaltung und Auswertung* der erhobenen Messdaten wird in neueren Bauwerksmonitoringsystemen zunehmend auf der Basis von Datenbanksystemen (DBS) realisiert. Die erfassen Messdaten werden dazu in Datenbanken abgespeichert und mittels angepasster Software aufbereitet und bearbeitet. In wenigen Fällen beruht die Verwaltung (und Interpretation) der Messdaten auf dem Einsatz von Tabellenkalkulationsprogrammen. Die Messdaten werden in diesem in Dateiform gespeichert und verwaltet.

Die einzelnen Komponenten eines Bauwerksmonitoringsystems werden in den folgenden Unterabschnitten genauer erläutert.

2.3.2 Datenerfassungssysteme

Die Datenerfassungssysteme sind Bestandteil der in situ installierten Messeinrichtungen eines Bauwerksmonitoringsystems (vgl. Unterabschn. 2.2.5). Sie übernehmen die Konditionierung (d.h. die Behandlung der elektrischen Größe) und die Digitalisierung der durch vom Messfühler gelieferten Signale. Die Geräte besitzen üblicherweise einen Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) und einen Multiplexer, der die gezielte Anwahl eines Signalkanals ermöglicht. Datenerfassungssysteme sind als eigenständige Messgeräte, als Erweiterungskarten für PCs oder kombinierte Datenerfassungs- und Datenspeicherungssysteme verfügbar, wobei sich die Auswahl der Geräte nach der Messfrequenz und der Anzahl der abtastbaren Kanäle richtet.

Zur Datenerfassung an dynamisch beanspruchten Bauwerken, wie z.B. Brücken, kommen vorwiegend PC-basierte Datenerfassungssysteme zum Einsatz, da die Abtastung („Sampling“) der Sensoren hier aufgrund des dynamischen Bauwerksverhalten im Frequenzbereich durchgeführt wird. Durch die hohe Messfrequenz entstehen große Datenmengen, die geeignete Spei-

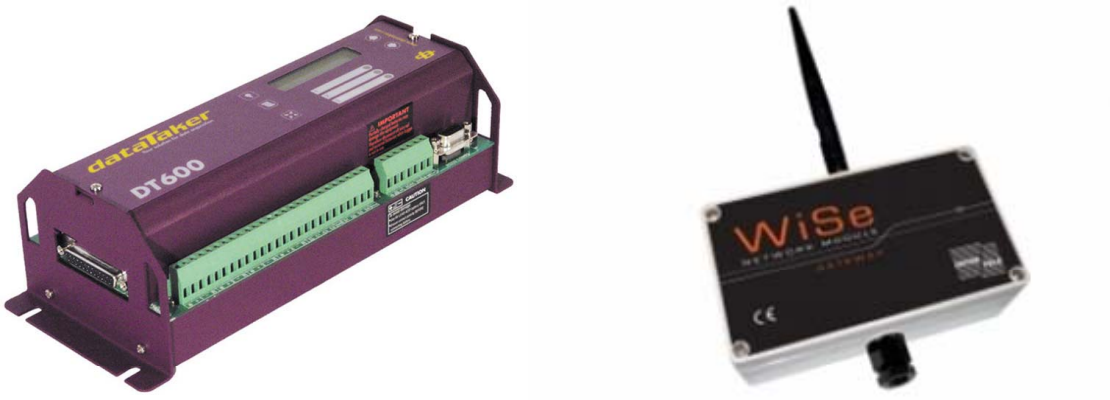


Abbildung 2.8: Autonome Datenerfassungssysteme für das Bauwerksmonitoring. Links: Datataker DT600, rechts: Interfels WiSe (Quellen: `www.datataker.com`, `www.interfels.de`)

chermechanismen erfordern. Aus diesem Grund werden die Datenerfassungssysteme i.d.R. mit einem Messrechner verbunden, auf dem die Messdaten lokal gespeichert werden. Kombinierte Datenerfassungs- und Datenspeicherungsgeräte, so genannte Datenlogger, werden vorwiegend eingesetzt, wenn die Daten mit niedriger Abtastung erfasst werden, die Verwendung PC-basierter Datenerfassungssysteme nicht wirtschaftlich ist oder die Umweltbedingungen sehr „rau“ sind. Datenlogger können aufgrund ihrer speziellen Hardware und eines internen Speichers Messdaten über längere Zeiträume selbsttätig, d.h. ohne einen Messrechner oder Steuerungssoftware aufzeichnen. Sie besitzen einen Mikroprozessor, sind programmierbar und können die Messdaten im internen Speicher oder auf einem externen Speichermedium ablegen. Abbildung 2.8 zeigt einen Datenlogger des Typs DataTaker DT600, der sich für den Anschluss und die Abfrage von 10 – 30 Sensoren eignet. Die charakteristischen Eigenschaften von Datenloggern werden aufgrund der Bedeutung dieser Geräte für die autonome Erfassung von Bauwerksphänomenen im Anhang A genauer erläutert.

Neuartige Lösungsmöglichkeiten der Datenerfassung ergeben sich durch drahtlose Sensornetze [Krüger 06]. Derartige Netze bestehen aus vielen Einzelknoten, den sog. Sensorknoten, die über eine eigene CPU, einen internen Speicher und angeschlossene Sensorik verfügen. Durch eine eigene Sende-/Empfangseinheit und Stromversorgung sind diese Knoten quasi autark und übertragen ihre Sensordaten per Kurzstreckenfunk an einen Sammelpunkt, das Gateway, der die Daten per Internet, Mobilfunk, etc. weiterleitet. Die Entwicklung und Anwendung der drahtlosen Sensortechnik auf Tragstrukturen des Bauingenieurwesens wurde z.B. in [Lynch 02a; Lynch 02b; Lynch 03] beschrieben. Erste derartige Systeme sind bereits am Markt verfügbar, z.B. das WiSe-System (vgl. Abb. 2.8). Die Anwendungsmöglichkeiten der drahtlosen Sensornetze wird bisher durch die Kapazität der Batterien eingeschränkt, da diese, insbesondere bei entsprechender Rechenlast des Knotens, sehr begrenzt ist. Die Energieversorgung der Sensorknoten aus alternativen Quellen, wie z.B. über Sonnenenergie oder Vibrationen, ist deshalb ein wichtiges Forschungsgebiet im Bereich der Sensornetze (vgl. z.B. [Ammar 05; Park 06] oder [Beeby 07]).

2.3.3 Datenübertragungs- und Datenspeicherungsmechanismen

Die Datenübertragung und Datenspeicherung erfolgt in Bauwerksmonitoringsystemen überwiegend durch eine eigenständige Softwarekomponente. Die Hauptaufgabe dieser Komponente

besteht darin, die in den internen Gerätespeichern der Datenlogger oder auf den Messrechnern abgelegten Messdaten zu extrahieren, für die weitere Verarbeitung aufzubereiten und in einem Zielformat abzulegen bzw. zu speichern. Überwiegend werden die Messdaten in Dateien in einem für den Fernzugriff zugänglich gemachten Verzeichnis (z.B. mittels FTP[8]-Freigaben) abgelegt, von wo aus sie von weiteren Komponenten verarbeitet werden. Der Fernzugriff auf die Messdaten wird häufig auch durch Fernzugangssoftware realisiert, mit deren Hilfe man sich in den entfernten Rechner einschalten und Dateien, Verzeichnisse, etc. auf den lokalen Rechner übertragen kann.

Die Messdaten werden danach entweder in Messdateien, wobei die Messdateien auf einem lokalen Rechner bzw. Server abgelegt werden, oder zunehmend auch in — im Hinblick auf die Datenverwaltung überaus leistungsfähigen — Datenbanksystemen (s.u.) gespeichert. Bei der Nutzung von Datenbanksystemen müssen die Messdaten allerdings zuvor in das in der Datenbank implementierten Zielformat umgewandelt werden.

Weiterhin sehr verbreitet, insbesondere bei einer zeitlich befristeten Überwachung, ist das Auslesen von Messdaten vor Ort. Dazu wird ein tragbarer Computer mit dem Messrechner bzw. den Datenerfassungsmodulen verbunden und die Messdaten direkt übertragen. Die weitere Verarbeitung erfolgt dann auf einem der beiden oben beschriebenen Wege.

2.3.4 Datenverwaltung und -auswertung

Die gespeicherten Messdaten werden in Bauwerksmonitoringsystemen entweder teilintegriert durch den Einsatz von Standardsoftware (z.B. Tabellenkalkulationsprogramme) oder vollintegriert durch die Einbindung von Datenbanksystemen verwaltet. Im ersten Fall werden die Messdaten händisch oder automatisiert in das jeweilige Programm (z.B. MS Excel, Lotus 1-2-3) eingegeben und können danach in der Software aufbereitet sowie zur grafischen Auswertung in Diagrammform dargestellt werden. Nachteilig ist jedoch, dass die Tabellenkalkulationsprogramme konzeptbedingt nur beschränkte Fähigkeiten in der Datenspeicherung und -verwaltung besitzen. Aus diesem Grund werden Datenbankmanagementsysteme (DBMS) und zunehmend auch angepasste Datenbankanwendungen eingesetzt, die den einfachen Zugriff auf die vom DBMS verwalteten Daten und die Aufbereitung/Ausgabe der Messdaten in Diagrammform sowie in verschiedenen Ausgabeformaten auf der Basis einer grafischen Benutzungsschnittstelle ermöglichen [Myers 00].

Neuere Monitoringsysteme besitzen darüber hinaus eine integrierte Komponente zur Datenauswertung. In Abhängigkeit von den beobachteten Bauwerksphänomenen, den dynamischen Eigenschaften des Bauwerks und der Zielsetzung des Monitorings werden dabei verschiedene Analyseverfahren angewendet. Erfasste Messdaten lassen sich somit mittels geeigneter Verfahren entweder direkt ausgewerten — z.B. durch Ermittlung von Frequenzen, Häufigkeiten und Verteilungen — oder bilden die Eingabe für weiterführende Berechnungsmodelle, die ihrerseits zur Schadenserkennung (vgl. Unterabschn. 2.2.7) oder die Sicherheitsbewertung verwendet werden (vgl. Unterabschn. 2.2.8). Der Übergang zu Strukturüberwachungssystemen (CSHM-Systemen) ist hierbei fließend. Das Vorhandensein einer Komponente zur *automatisierten Schadenserkennung* kann deshalb als Unterscheidungskriterium zwischen computerbasierten Bauwerksmonitoring- und Strukturüberwachungssystemen verwendet werden.

[8] engl.: File Transfer Protocol, Netzwerkprotokoll zur Datenübertragung zwischen Computern in einem Netzwerk

Kapitel 3

Grundlagen der Multiagentensysteme

„(...) the most powerful abstractions are those that minimize the semantic gap between the units of analysis that are intuitively used to conceptualize the problem and the constructs present in the solution paradigm.“

N. Jennings, 1999, aus [Jennings 99]

3.1 Softwareagenten und Multiagentensysteme

3.1.1 Definition

Softwareagenten[1] sind in der modernen Informatik ein Ansatz zur mikroskopischen Modellierung, Simulation und Steuerung von verteilten komplexen Systemen. Das Konzept der Softwareagenten und der von ihnen aufgebauten Agenten- bzw. Multiagentensysteme stammt ursprünglich aus der Künstliche Intelligenz (KI)-Forschung, speziell aus dem Bereich der Verteilte Künstliche Intelligenz (VKI)-Forschung, wo — im Gegensatz zur traditionellen KI-Forschung — Intelligenz als eine Leistung betrachtet wird, die durch die Interaktion zwischen relativ unabhängigen und autonomen Einheiten, Agenten genannt, zustande kommt. Dieser Ansatz führte erstmalig zur Idee der Multiagentensysteme (MAS), künstlichen, rechnerbasierten Organisationen, deren kollaboratives Problemlösungsverhalten auf der Kooperation der einzelnen Agenten beruht und die nach der jeweiligen Problemstellung in Suborganisationen strukturiert sind. In dieser Arbeit wird ein Multiagentensystem nach Bond & Gasser [Bond 88] als ein Softwaresystem aufgefasst, in dem mehrere Agenten — durch die *Koordination* ihres Wissens sowie ihrer Ziele, Fähigkeiten und Pläne — *gemeinsam handeln* und so *Probleme lösen.*

Die Agenten eines MAS können als autonome Softwarekomponenten betrachtet werden, die im Gegensatz zu Diensten (Services) nicht nur reaktives, sondern auch proaktives Verhalten zeigen können. Sie sind für die ihnen zugewiesenen Prozesse zuständig und werden in den Softwaresystemen eingesetzt, um das Erreichen von Zielen zu überwachen. Häufig besitzen die Agenten detaillierte Ausführungspläne, die das Erreichen von zuvor definierten Teilzielen unterstützen und auf diese Weise zum Gesamtziel hinführen.

[1] Im Folgenden werden die Begriffe „Agent“ und „Softwareagent“ synonym verwendet.

Mit Hilfe von Multiagentensystemen lässt sich die Konstruktion komplexer Systeme vereinfachen, indem eine Abstraktionsebene eingeführt wird, in der autonome interagierende Akteure (die Agenten) das System steuern und überwachen. Neu am Multiagentensystemansatz ist also der Anspruch und die ingenieurmäßige Sichtweise der Autonomie sowie das Handlungsbewusstsein der Agenten.

Multiagentensysteme sind zunehmend auch die Basis für das sog. *Autonomic Computing* und *Organic Computing*. Auf beiden Forschungsgebieten werden die „Selbst-Eigenschaften“ eines Systems wie Selbstorganisation, Selbstkonfiguration, Selbstoptimierung und Selbstheilung eingesetzt, um ein robustes, fehlertolerantes und eigenständiges Systemverhalten zu erreichen. Es geht hierbei vor allem darum, die Selbstorganisation des System zu steuern, damit ein gewünschtes, durch Selbstorganisation entstehendes Verhalten (Emergenz) positiven Einfluss auf die Systemfunktionalität hat [Wikipedia 08, „Organic Computing“]. Ein Multiagentensystemansatz für das Autonomic Computing wurde z.B. in [Tesauro 04] beschrieben.

3.1.2 Sichtweise auf ein Multiagentensystem

Ein MAS kann als eine rechnerbasierte Organisation betrachtet werden, die aus mehreren interagierenden Agenten besteht. Die Agenten sind zur Problemlösung in mehreren Organisationseinheiten bzw. Gruppen organisiert, wobei jeder Agent eine bestimmte Einflusssphäre in der Umgebung des MAS besitzt, die er durch seine Aktionen beeinflussen und verändern kann (vgl. Abb. 3.1).

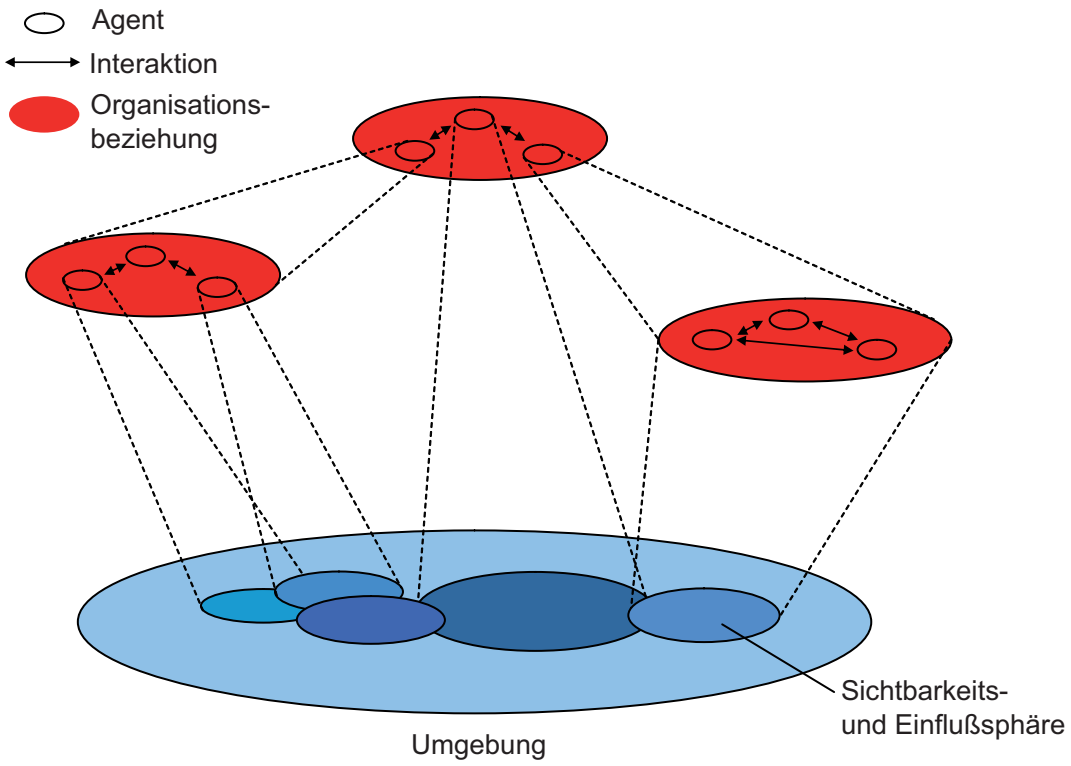


Abbildung 3.1: Sicht auf ein Multiagentensystem nach Jennings [Jennings 01]

Der oben beschriebene Aufbau von Multiagentensystemen spiegelt den inhärenten verteilten Problemlösungsansatz wider: Das zu lösende Problem wird in kleine abgeschlossene Teilprobleme zerlegt, die von spezialisierten Problemlösungseinheiten, den Agenten, bearbeitet werden. Die von den einzelnen Agenten gelieferten Teillösungen werden dann zur Lösung des

Problems zusammengeführt. Die Lösung einer Teilaufgabe kann dabei in unterschiedlichen Organisationsformen ablaufen, wobei die Kommunikation und Koordination der Agenten von zentraler Bedeutung ist[2].

Aus dieser Sichtweise ergeben sich die wesentlichen Abstraktionen eines Multiagentensystems, die zur informatischen Analyse und Modellierung von Multiagentensystemen verwendet werden:

- die Agenten, von denen das MAS gebildet wird,
- die Umgebung, in die das MAS eingebettet ist,
- die Interaktionen zwischen den Agenten,
- die Organisationsregeln und -strukturen.

Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben wird, werden Multiagentensysteme mittels spezifischer agentenorientierter Entwicklungsmethodologien entwickelt, die auf die Abstraktionen der Multiagentensysteme abgestimmt sind und sich dadurch von den objektorientierten Methoden unterscheiden.

3.1.3 Agentenbegriff

In der Informatik wird die Definition eines Agenten als selbständige, parallel ablaufende Entität, die ihren eigenen Zustand einkapselt und mit anderen Entitäten kommuniziert, als eine *natürliche Erweiterung der Objektorientierung* angesehen [Pauk 97]. Insbesondere auf dem Gebiet der KI-Forschung wird mit dem Begriff „Agent“ sogar eine noch stärkere Bedeutung verknüpft. Neben den oben genannten Eigenschaften soll ein Agent stärkere menschliche Züge tragen: einem Agenten werden Bewusstseinszustände wie Wissen, Überzeugung, Absicht und Verantwortung zugeordnet (vgl. Abschn. 3.2).

Bis heute existiert jedoch keine einheitliche Definition der Begriffe „Agent“ und „Softwareagent“. Dies liegt vor allem daran, dass der Agentenbegriff häufig in einem spezifischen Kontext verwendet wird, sodass sich in der Literatur zahlreiche, domänenspezifische Ausprägungen des Agentenbegriffs finden (vgl. Wooldridge & Jennings [Wooldridge 95], Brooks [Brooks 91], Nwana [Nwana 96], Maes [Maes 95] oder Hartmann & Bilek [Hartmann 07]). Eine besondere Stellung nimmt der von Wooldridge und Jennings in [Wooldridge 95] vorgestellte „schwache Agentenbegriff“ ein, die so genannte „weak notion of agency“. Der schwache Agentenbegriff bildet die Grundlage für viele Definitionen und wird auch für die vorliedende Arbeit zur Defintion der Agenteneigenschaften übernommen. Folgende Eigenschaften eines Agenten werden darin definiert:

Autonomie: Agenten kontrollieren ihren inneren Zustand sowie ihre Aktionen und operieren ohne direktes Eingreifen durch den Anwender.

Sozialverhalten: Agenten kommunizieren miteinander mittels einer Agentenkommunikationssprache. Die Kommunikation erfolgt überwiegend nachrichtenbasiert, d.h. durch den Austausch von Nachrichten mit festgelegtem Format und Syntax. Die Semantik wird durch Ontologien beschrieben.

Reaktivität: Agenten nehmen ihre Umwelt wahr und reagieren auf Veränderungen in dieser. Zur Umweltwahrnehmung besitzen die Agenten Sensoren (Schnittstellen) und reagieren auf Umweltreize durch das Steuern eines Aktuators oder das Ausführen einer Aktion.

[2] vgl. Abschn. 3.3

Proaktivität: Agenten reagieren nicht nur auf Änderungen in ihrer Umwelt. Sie besitzen ein zielgerichtetes Verhalten und sind in der Lage, selbständig die Initiative zu ergreifen. Proaktive Agenten besitzen ein Modell ihrer Umwelt und wirken aktiv auf die Umwelt ein, um ihre Ziele zu erreichen.

Der innere Aufbau eines Agenten wird durch die bisher beschriebenen Agenteneigenschaften jedoch nur abstrakt definiert. In den letzten Jahren wurden deshalb verschiedene Agentenarchitekturen entwickelt, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

3.2 Agentenarchitekturen

In der Informatikforschung hat sich eine Unterscheidung der Agentenarchitekturen in (i) deliberative, (ii) reaktive und (iii) hybride Architekturen etabliert.

3.2.1 Deliberative Architekturen

Agenten mit einer *deliberativen*[3] oder *logikbasierten Architektur* besitzen die Fähigkeit zu zielgerichtetem Handeln und verfügen zu diesem Zweck über ein symbolisches Modell ihrer Umwelt. Die bekannteste logikbasierte Architektur ist die BDI-Architektur. In dieser zunächst von Bratman [Bratman 87] entwickelten und später von Rao & Georgeff [Rao 91; Rao 95] für die Praxis adaptierten Architektur wurden die Agenten mit künstlichen Bewusstseinszuständen ausgestattet, indem sie Wissen über ihre Umwelt (beliefs), erstrebenswerte Zustände (desires) und aktuell verfolgte Absichten (intentions) erhielten.

Der BDI-Agent ist mit Sensoren und Effektoren ausgestattet, die ihn über seine Umwelt aufklären bzw. seine Aktionen auf die Umwelt übertragen. Dazwischen arbeitet ein Interpreter, der Sensoreingaben verarbeitet (Input) und Aktionen auswählt (Output). Im Unterschied zu anderen Agentenarchitekturen besitzen BDI-Agenten besondere Datenstrukturen, auf denen der Interpreter arbeitet [Wikipedia 08, „BDI Agenten“]:

Weltwissen (beliefs): Die Informationen über die Welt, in der sich der Agent aufhält und schlussfolgert, werden in einer Wissensdatenbank gespeichert, die Fakten über die aktuelle Umgebung, den internen Zustand des Agenten und Hintergrundwissen enthält, das für Schlussfolgerungen benötigt wird. Die Speicherung erfolgt häufig in Form einer symbolischen Repräsentation, wobei diese hinsichtlich der Wahrnehmung des Agenten und internen Schlussfolgerungen ständig aktualisiert werden muss, um die Weltvorstellung des Agenten gültig zu halten.

Ziele (desires): Die Hauptziele des Agenten werden in einer weiteren Datenbank gespeichert. Die Hauptziele sind diejenigen Ziele, die das Verhalten des Agenten grundlegend beeinflussen und über einen bestimmten Zeitraum verfolgt werden. Desires sind ein entscheidender Teil des deliberativen Agentenverhaltens, da der Agent ohne Ziele zu keinen weiteren Aktionen veranlasst wird. Durch die Zielorientierung des Agenten wird selbst im Fall einer fehlgeschlagenen Aktion das ausgewählte Ziel weiter verfolgt, z.B. durch einen alternativen Lösungsansatz oder einen erneuten Versuch.

Absichten (intentions): Der BDI-Agent verfügt über eine Plandatenbank, aus der er hierarchisch organisierte Pläne auswählen kann, die ihn seinem Ziel näherbringen. Die jeweils ausgewählten Pläne (Intentionen) enthalten im Normalfall Teilziele, für die dann

[3] von lat. deliberare: beratschlagen, abreden, in Bedenken ziehen

jeweils ein passender, hierarchisch untergeordneter Plan ausgewählt wird. Diese Planauswahl und -abarbeitung wird bis auf die Ebene elementarer Aktionen wie z.B. das Ansteuern eines Motors durchgeführt.

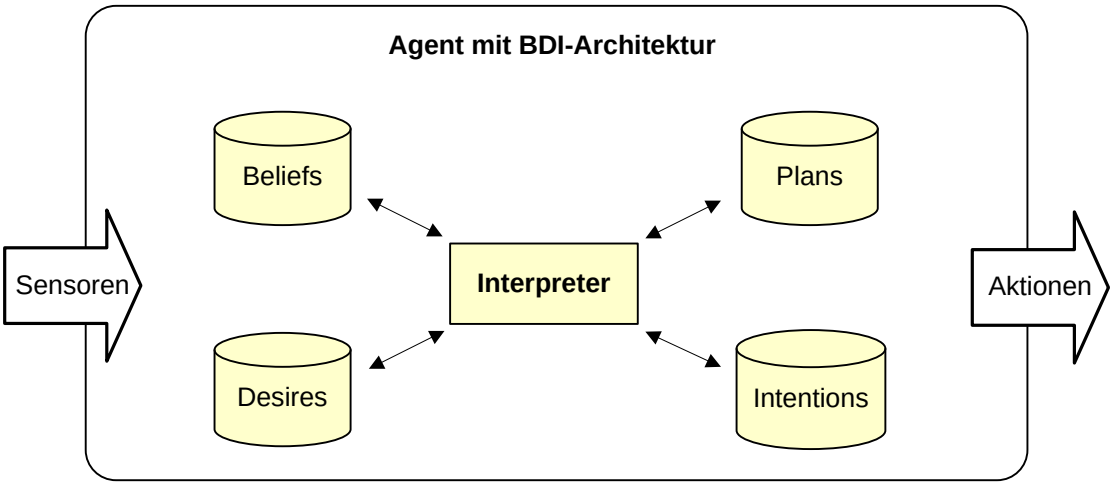


Abbildung 3.2: Aufbau eines Agenten mit BDI-Architektur

3.2.2 Reaktive Architekturen

Agenten mit einer *reaktiven Architektur* besitzen keine detaillierte interne Repräsentation ihrer Umwelt. Sie nehmen ihre Umwelt wahr und reagieren auf einen äußeren Reiz wie eine Veränderung in ihrer Umwelt. Im Gegensatz zu deliberativen Agenten planen reaktive Agenten ihre Aktionen nicht im voraus und bestehen aus mehreren sog. Kompetenzmodulen, die direkt mit den Sensoren (Schnittstellen) des Agenten verbunden sind. Die Kompetenzmodule verarbeiten das Ereignis und steuern die Aktoren des Agenten.

Die bekannteste reaktive Architektur ist die Subsumptionsarchitektur von Brooks [Brooks 85]. Sie wurde von Brooks für den Robotikbereich entwickelt und beruht auf der Hypothese, dass ein in einer unbekannten Umgebung sich befindender Agent (Roboter) auf eine Karte, einen Plan und sogar auf ein Gedächtnis verzichten könnte und trotzdem in der Lage wäre, autonom zu agieren. Den weit vorausplanenden, deliberativen Agenten (s.o.), die lange rechneten und dann wenig taten, stellte Brooks seine Idee einer „Intelligenz ohne Repräsentation“ [Brooks 91] gegenüber. Ab Mitte der achtziger Jahre entwarf er erste Roboter nach dem neuen Prinzip, das er als „Subsumption Architecture“ bezeichnete.

Die Subsumptionsarchitektur verfolgt den eleganten Ansatz, komplexes Verhalten auf einem Fundament simpler Verhaltensbausteine aufzubauen. Die einfachen Kompetenzmodule des Agenten (wie z.B. „Avoid Obstacles“) werden von abstrakteren Handlungsweisen wie „explore“ eingefasst oder „subsumiert“ (s. Abb. 3.3). Der Agent verfügt hierbei über eine Reihe definierter Zustände; der aktuelle Zustand des Roboters ist stets eindeutig. Wechselt der Agent aufgrund von äußeren Umständen von einem Zustand in den anderen, ändert sich auch sein Verhalten. Von Vorteil ist, dass die Subsumptionsarchitektur nach oben offen ist: Auf den höchsten Ebenen finden aufwendige Tätigkeiten ihren Platz. Verzichtet man darauf, reagiert der Agent im Rahmen seiner Handlungsweisen unmittelbar auf die Umgebung und reagiert damit in vielen Fällen sehr robust [Grimmer 06].

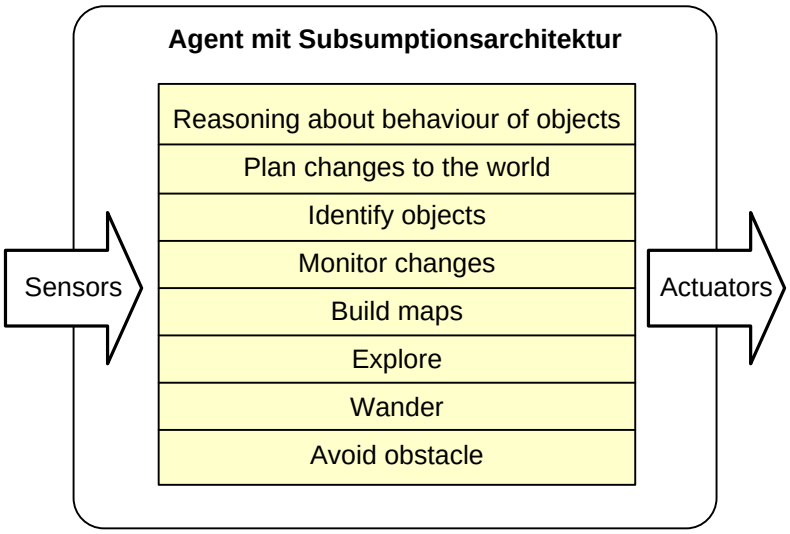


Abbildung 3.3: Subsumptionsarchitektur nach Brooks [Brooks 85]

3.2.3 Hybride Architekturen

Hybride oder geschichtete Architekturen [Ferguson 91; Muller 95] erlauben sowohl ein reaktives als auch ein deliberatives Agentenverhalten. Für die erforderliche Flexibilität kombinieren Agenten mit hybrider Architektur ein reaktives mit einem deliberativen Subsystem. Die einzelnen Subsysteme des Agenten werden dabei in hierarchischen Schichten angeordnet. Innerhalb der Schichtenarchitektur sind prinzipiell zwei Kontrollflüsse möglich: eine horizontale oder eine vertikale Schichtung. Bei einer horizontalen Schichtung werden die einzelnen Schichten direkt mit den Sensoreingängen und den Aktorausgängen verbunden. Der Vorteil dieser Architektur ist ihre Einfachheit, da der Agent bei n Verhalten n Schichten besitzt. Es kann jedoch bei der Verarbeitung von Sensoreingaben zu Inkonsistenzen zwischen den einzelnen Schichten kommen, sodass eine Vermittlung zwischen den Schichten erforderlich wird. Die vertikale Schichtung beseitigt diesen Nachteil, indem die Bearbeitung vertikal abläuft. Die durch die Sensoren gelieferten Informationen durchlaufen alle Schichten bis schließlich auf unterster Ebene die Aktoren angesteuert werden.

3.3 Kommunikation und Koordination

3.3.1 Sprechakte

Die Agenten eines MAS müssen in der Lage sein, untereinander, mit Nutzern und Systemressourcen zu kommunizieren. Zur Sicherstellung eines erfolgreichen Kommunikationsablaufs und eines zuverlässigen Nachrichtenaustauschs kommen in Multiagentensystemen überwie-

gend nachrichtenbasierte Kommunikationsverfahren[4], so genannte Agentenkommunikationssprachen, zur Anwendung, die auf der Sprechakttheorie beruhen.

Die Sprechakttheorie [Austin 62; Searle 69] beruht auf der Annahme, dass Nachrichten Aktionen — so genannte Sprechakte bzw. Performative — repräsentieren. Es wurde erkannt, dass bestimmte natürlichsprachige Äußerungen, die Sprechakte, gleichzeitig eine Handlung vollziehen können und somit die Eigenschaften von physischen Handlungen (Aktionen) besitzen, da sie den Zustand der realen Welt in einer Weise verändern können, die physischen Aktionen entspricht. Beispiele solcher performativer Verben sind request, inform und promise.

Die Erkenntnis, dass Sprechakte wie physische Handlungen behandelt werden können, wurde dann zur Entwicklung von Agentenkommunikationssprachen[5] genutzt. In den bis heute dominierenden Agentenkommunikationssprachen Knowledge Query and Manipulation Language (KQML) und FIPA Agent Communication Language (FIPA-ACL) wurden zahlreiche Sprechakte spezifiziert, darunter z.B. die Sprechakte `inform` mit dem der Sender den Empfänger informiert, dass eine bestimmte Aussage wahr ist, oder `request`, mit dem der Sender den Empfänger auffordert, eine Aktion auszuführen. Die wichtigsten Sprechakte (Performative) der FIPA-ACL sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1: FIPA Sprechakte

FIPA Sprechakt	Beschreibung
`Inform`	Der Sender informiert den Empfänger, dass eine bestimmte Aussage wahr ist
`Request`	Der Sender fordert den Empfänger auf, eine Aktion auszuführen
`Query If`	Fragehandlung, bei der ein anderer Agent gefragt wird, ob eine Aussage wahr ist oder nicht
`Agree`	Die Handlung des Zustimmens, dass eine Aktion ausgeführt wird, u.U. in der Zukunft
`Refuse`	Der Agent weigert sich, eine bestimmte Aktion auszuführen und nennt Gründe für die Weigerung

3.3.2 Kommunikationssprachen

Die erste bedeutende Agentenkommunikationssprache war die *Knowledge Manipulation Language* (KQML) [Finin 94; Mayfield 96], die in den 1990er Jahren im Rahmen des DARPA[6] Knowledge Sharing Efforts entwickelt wurde. KQML definiert ein allgemeines Format für Agentennachrichten. Jede Nachricht besitzt einen Sprechakt und eine Reihe Parameter. KQML besitzt einen Schichtaufbau, der eine Trennung von Nachrichtensyntax, Nachrichteninhalt und sematischer Repräsentation ermöglicht. Zum Austausch von Informationen und Wissen definiert KQML eine Reihe von Sprechakten und erlaubt die Repräsentation des Nachrichteninhalts in der Wissensbeschreibungssprache Knowledge Interchange Format (KIF) [Genesereth 94].

Listing 3.1: KQML-Beispielnachricht

```
(ask-one
```

[4] Auf die Beschreibung blackboardbasierter Kommunikationsverfahren wird hier verzichtet, da diese zunehmend an Bedeutung verlieren und nicht zur Realisierung des in dieser Arbeit entwickelten Multiagentensystems verwendet wurden.

[5] vgl. Unterabschn. 3.3.2

[6] Defense Advanced Research Projects Agency, Behörde des amerikanischen Verteidigungsministeriums zur Durchführung von Forschungsprojekten

```
:content (VALUE SENSOR13 ?value)
:receiver DAQ-Agent
:language LPROLOG
:ontology MONITORING-SENSORS
)
```

In Listing 3.1 ist eine KQML-Beispielnachricht dargestellt. Die Bedeutung dieser Nachricht ist, dass der Sender den Empfänger der Nachricht nach dem Wert von Sensor 13 fragt. Als Sprechakt für diese Nachricht wird `ask-one` verwendet. Dies bedeutet, dass der Sender genau eine Nachricht als Antwort auf seine Frage erwartet (obwohl theoretisch vielleicht mehrere Antworten möglich sind). Die folgenden Felder stellen die Attribute der Nachricht dar. Das wichtigste dieser Attribute ist das `:content`-Feld, das den Nachrichteninhalt festlegt. In diesem Fall besteht der Nachrichteninhalt aus der Frage nach dem Wert eines Sensors. Das Attribut `:receiver` legt den Empfänger der Nachricht, `:language` die Sprache, in der der Inhalt ausgedrückt wird, und `:ontology` die verwendete Terminologie fest.

Die heute vorherrschende Agentenkommunikationssprache ist die FIPA[7] Agent Communication Language (FIPA-ACL) [FIPA 07, „FIPA ACL Message Structure Specification“, SC00061]. Die allgemeinen Nachrichtenparameter einer FIPA-ACL-Nachricht wurden in der FIPA ACL Message Structure Specification [FIPA 07, „FIPA ACL Message Structure Specification“, SC00061] spezifiziert. Der Sprechakt der Nachricht findet sich dabei im Paramter `performative` wieder. Wichtige Erweiterungen gegenüber KQML sind die Parameter `protocol` und `conversation-id`, die eine Definition von Interaktionsprotokollen und Gesprächskennungen für Nachrichten ermöglichen und somit die Einordnung von Nachrichten zu Konversationssträngen erleichtern. Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über die von der FIPA spezifizierten Nachrichtenparameter einer FIPA-ACL-Nachricht.

Tabelle 3.2: FIPA ACL-Nachrichtenparameter

Parameter	Beschreibung
`Performative`	Sprechakt der Nachricht
`sender`	Identität des Nachrichtensenders
`receiver`	Identität des/der beabsichtigten Nachrichtenempfänger
`reply-to`	Empfänger für nachfolgende Nachrichten in einem Konversationsstrang
`content`	Nachrichteninhalt
`language`	Sprache, in der die Nachricht ausgedrückt ist
`encoding`	Spezifische Nachrichtenkodierung
`ontology`	Verweis auf eine Ontologie
`protocol`	Interaktionsprotokoll zur Strukturierung der Konversation
`conversation-id`	Eindeutiger Identifizierer eines Konversationsstranges
`reply-with`	Ausdruck zur Identifizierung der Nachricht
`in-reply-to`	Verweis auf eine frühere Aktion
`reply-by`	Datums-/Zeitangabe, bis wann eine Antwort erwartet wird

Wie KQML beruht FIPA-ACL auf der Sprechakttheorie und orientiert sich stark an der KQML, erweitert diese aber in wichtigen Punkten. Gegenüber der KQML wurde z.B. die Durchführung von Konversationen durch die Einführung vorgefertigter Interaktionsprotokolle (vgl. Unterabschn. 3.3.3) vereinfacht und Verwendung verschiedener Inhaltssprachen ermöglicht. Insbesondere das Fehlen einer semantisch korrekten Beschreibung des Nachrichteninhalts wurde als große Schwäche der KQML betrachtet [Cohen 95]. Die Spezifikation

[7] Foundation for Intelligent Physical Agents, Standardisierungsgremium im Bereich der Agentensysteme, vgl. Unterabschn. 3.4.2

der FIPA-ACL schreibt aus diesem Grund die Verwendung von Content Languages (engl. content language - Inhaltssprache) zur Beschreibung des Nachrichteninhalts vor. Durch die Verwendung einer Content Language wird sichergestellt, dass die Agenten den Inhalt einer Nachricht nicht nur syntaktisch sondern auch semantisch erfassen können. Derzeit existieren 4 Inhaltssprachen, die Semantic Language (SL) [FIPA 07, „FIPA SL Content Language Specification“, SC00008], die Constraint Choice Language (CCL), das Knowledge Interchange Format (KIF) und das Resource Description Framework, wobei jedoch nur die Semantic Language als Standard verabschiedet wurde.

Die FIPA Semantic Language (SL) ist eine von der FIPA spezifizierte Inhaltssprache zur semantischen Beschreibung des Inhalts von FIPA-ACL-Nachrichten. Sie ist eine Logiksprache, die auf der Prädikatenlogik erster Ordnung[8] beruht und diese um agentenspezifische Operatoren und Ausdrücke erweitert.

3.3.3 Interaktionsprotokolle

Ein weiteres wichtiges Element der Agentenkommunikation sind so genannte Interaktionsprotokolle (IP). Diese beschreiben eine Reihe wiederkehrender Kommunikationsszenarien, die in einfachen Anfrage- und Informationsdialogen oder komplexen Interaktionen wie z.B. Auktionen oder Verhandlungen vorkommen. Durch die Verwendung von Interaktionsprotokollen und ihre Verknüpfung bzw. Verschachtelung können beliebig komplexe Konversationen zwischen Agenten realisiert werden.

Die wichtigsten Interaktionsprotokolle wurden von der FIPA standardisiert, z.B. in der FIPA Request Interaction Protocol Specification (SC00026) oder der der FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification (SC00029). Die formale Spezifikation der Interaktionsprotokolle erfolgt auf der Basis von AUML[9]-Sequenzdiagrammen. Die interagierenden Agenten werden darin durch Lebenslinien und die Nachrichten durch offene Pfeile dargestellt.

Exemplarisch ist in Abbildung 3.4 das FIPA-Request-Interaktionsprotokoll in AUML-Notation dargestellt. Das FIPA-Request-Interaktionsprotokoll legt den generischen Kommunikationsablauf für die Situation fest, in der ein Agent (`Initiator`) einen oder mehreren Agenten (`Participant`) auffordert, eine Aktion auszuführen. Der `Initiator` sendet dabei zunächst eine Aufforderung (`request`) an den `Participant`. Dieser verarbeitet die Aufforderung und entscheidet, ob er die Aufforderung akzeptiert, deren weitere Bearbeitung durch das Verschicken einer Antwort (`refuse`) verweigert oder die Bearbeitung für den Fall, dass dies angezeigt wurde (`notification necessary`) explizit mit einem `agree` bestätigt. Wenn der `Participant` der Aufforderung zugestimmt hat, muss dieser entweder kommunizieren, dass bei der Bearbeitung ein Fehler aufgetreten ist (`failure`) oder die Bearbeitung fehlerfrei abgeschlossen wurde (`inform-done` bzw. `inform-result`). Die Antwort `inform-result` wird hierbei verwendet, um dem `Initiator` nicht nur zu signalisieren, dass die Bearbeitung abgeschlossen wurde, sondern auch um ihn über das Ergebnis benachrichtigen.

3.3.4 Koordination

Zur effektiven, kollaborativen Problemlösung müssen die Agenten eines MAS koordiniert werden. Es muss insbesondere sichergestellt werden, dass sich eine Gemeinschaft aus mehreren

[8] engl.: first order logic, abgekürzt FOL

[9] Die Agent Unified Modeling Language (AUML) ist eine grafische Modellierungssprache, die auf der Unified Modeling Language (UML) beruht und diese um spezifische Konzepte für die agentenorientierte Modellierung erweitert.

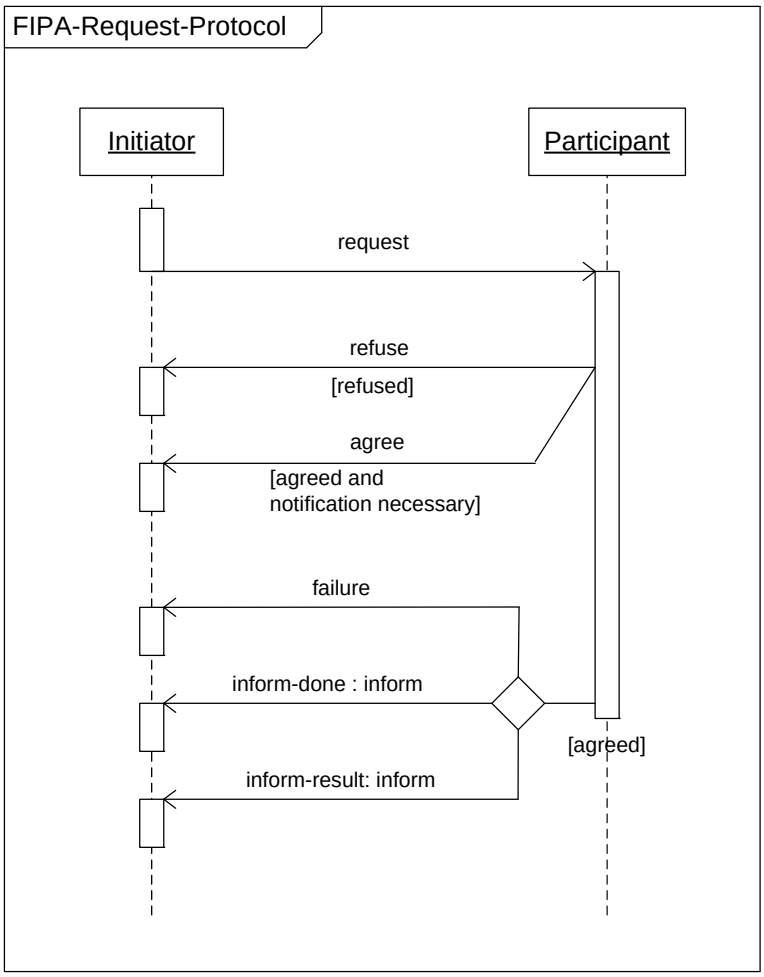


Abbildung 3.4: FIPA-Request-Interaktionsprotokoll

Agenten in kohärenter Weise verhält [Nwana 96]. Ein nicht-kohärentes Agentenverhalten tritt z.B. dann auf, wenn die Ziele der einzelnen Agenten Konflikte zwischen den Aktionen der Agenten verursachen, die Ziele der Agenten voneinander abhängig sind oder die Agenten unterschiedliche Fähigkeiten besitzen und unterschiedliches Wissen haben.

Ein wichtiger Ansatz zur Koordination von Agenten ist der Aufbau einer *Organisationsstruktur*. Durch die Definition von Rollen, Kommunikationspfaden und Autoritätsbeziehungen kann ein Rahmenwerk für Aktivität und Interaktionen geschaffen werden. Der einfachste Weg zur Sicherstellung eines kohärenten Verhaltens und zur Auflösung von Konflikten besteht dabei in der Entwicklung eines übergeordneten Agenten, der eine breite Sicht auf das System hat und die Organisationsstruktur bzw. Hierarchie in einer Gruppe nutzt. Der übergeordnete Master-Agent kann somit Informationen von den Agenten zusammentragen, Pläne erstellen und Aufgaben an einzelne Agenten zuweisen, um die globale Kohärenz sicherzustellen. Nachteilig ist jedoch, dass diese Koordinationstechnik zu einer klassischen Master/Slave- bzw. Client/Server-Architektur führt, mit zentraler Kontrolle durch den Master. Da eine zentrale Kontrolle im Widerspruch zur dezentralen Natur von Multiagentensystemen steht, ist unbedingt darauf zu achten, dass die Slave-Agenten zumindest mit der Fähigkeit zu einem teilautonomen Verhalten ausgestattet werden.

Eine weitere, wichtige Koordinationstechnik zur Aufgaben- und Ressourcenzuweisung zwischen Agenten ist die *Auftragsvergabe*. Dieser Ansatz basiert auf einer dezentralisierten Organisationsstruktur, in der Agenten zwei Rollen übernehmen können: die Rolle eines Auftraggebers (manager) oder eines Auftragnehmers (contractor). Die Auftragsvergabe setzt voraus, dass ein Agent ein ihm zugewiesenes Problem in Sub-Probleme zerlegen kann und versucht, andere Agenten mit den erforderlichen Resourcen/Expertise zur Problemlösung zu finden, sobald er das ihm zugewiesene Problem nicht selbst lösen kann. Zuweisungen von Sub-Problemen werden durch einen Auftragsvergabemechanismus, das so genannte *Contract-Net-Protokoll* [Smith 80], realisiert, das die folgenden Schritte beinhaltet (vgl. Abb. 3.5):

1. Bekanntgabe des Auftrags durch den Auftraggeber-Agenten,
2. Abgabe von Angeboten durch die Auftragnehmer-Agenten als Antwort auf die Ausschreibung und
3. die Beurteilung der abgegebenen Angebote.

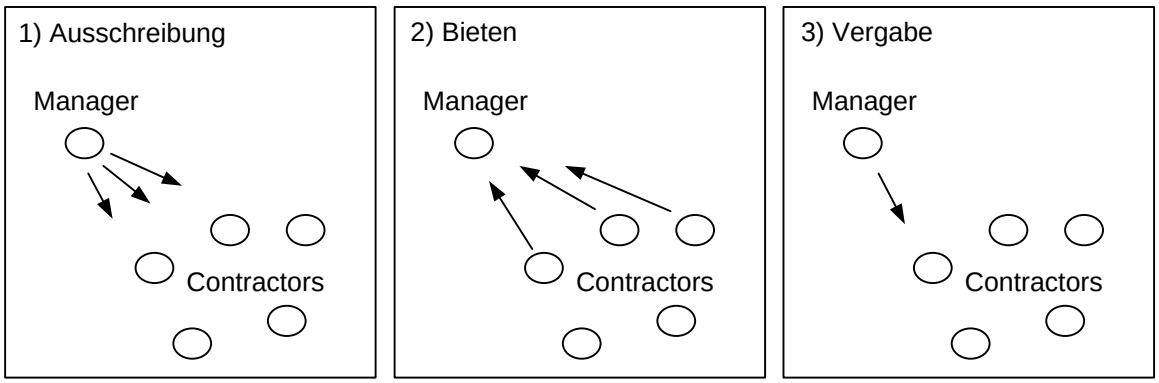


Abbildung 3.5: Phasen des Contract Net-Interaktionsprotokolls

Im Vorgriff auf Kapitel 4, sei erwähnt, dass die Koordination in dem in dieser Arbeit entwickelten Multiagentensystem auf der Einführung einer hierarchischen Organisationsstruktur in Verbindung mit einer dynamischen Auftragsvergabe an spezialisierte Agenten. Auf die Darstellung weiterer Ansätze zur Agentenkoordination wie die Multiagentensystemplanung [Georgeff 83; Georgeff 84] oder Verhandlung [Bussmann 92] wird aus diesem Grund an dieser Stelle verzichtet.

3.3.5 Ontologien

Ontologien sind ein informatischer Ansatz zur eindeutigen formalen Darstellung und Organisation von domänenspezifischem Wissen, der im Bereich der Multiagentensysteme sowie anderen Informatikbereichen wie dem semantischen Web oder der Bioinformatik zur Anwendung kommt. Mittels einer Ontologie wird ein Ausschnitt der realen Welt auf ein computerverarbeitbares Modell abgebildet, das die relevanten Begriffe (engl. concepts) dieses Weltausschnitts, der sog. Domäne, enthält. Dieser Vorgang wird nach [Gruber 93] als „Konzeptualisierung“ bezeichnet: „*Eine Ontologie ist eine formale, explizite Spezifikation einer gemeinsamen Konzeptualisierung.*“

Ontologien können in unterschiedlichen Ontologiesprachen mit jeweils unterschiedlicher Ausdrucksstärke umgesetzt werden. Als zugrundeliegender Standard hat sich hier die Extensible

Markup Language (XML) durchgesetzt. Alle wichtigen Ontologiesprachen wie RDF[10] bzw. RDF-Schema, DAML + OIL[11] und OWL [12] sind XML-basiert und ermöglichen die Formulierung elementarer Aussagen, wobei die Eindeutigkeit von Konzepten durch sog. Uniform Resource Identifiers[13] (URIs) hergestellt wird. Einfache Aussagen bestehen aus Subjekt, Prädikat und Objekt (sog. Tripel) und lassen sich untereinander zu einem Graph vernetzen. Höher entwickelte Ontologiesprachen erlauben schließlich eine semantisch untermauerte, logische Definition von Konzepten, sodass auch ein maschinelles Schlussfolgern komplexer Sachverhalte möglich wird. In Abbildung 3.6 ist beispielhaft die Aussage „*Messung 1234 hat die Einheit Millimeter*“ in RDF dargestellt. Subjekt, Prädikat und Objekt sind jeweils durch eine URI definiert. Das Prädikat „*hat die Einheit*“ wird im Beispiel durch die URI `http://www.inf.bi.rub.de/monitoring#hasUnit` abgebildet.

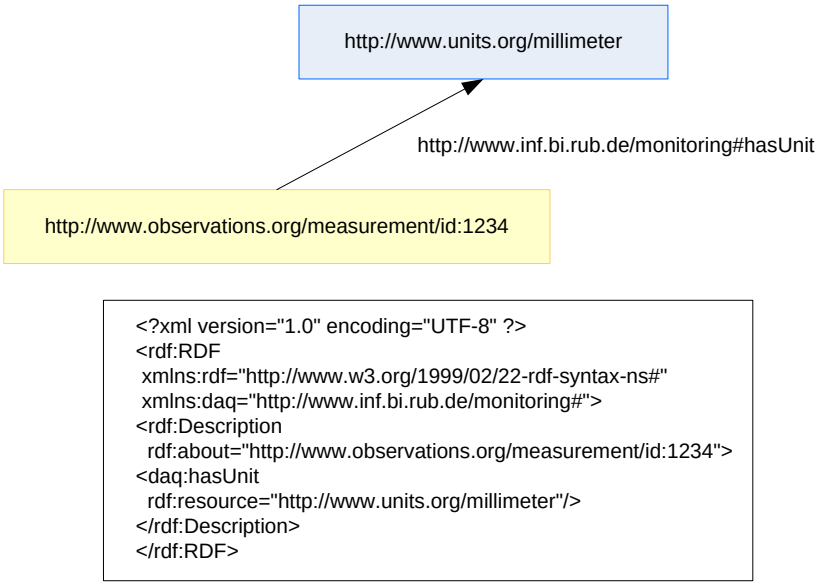


Abbildung 3.6: Einfache Aussage als RDF-Tripel

Die Erstellung von Ontologien wird heute durch spezielle Software, sog. Ontologie-Editoren[14], effektiv unterstützt. Die Editoren ermöglichen u.a. die interaktive Modellierung und den Export von Ontologien in unterschiedliche Ontologiesprachen. Auch der Export in objektorientierte Programmiersprachen, insbesondere Java, ist durch die Ähnlichkeit von Ontologien und Klassenmodellen gut unterstützt. Ein objektorientiertes Modell einer Ontologie mit einem spezifischen Zuschnitt auf Multiagentensysteme ist in Abb. 3.7 dargestellt. Dieses Modell wurde in der vorliegenden Arbeit auf die Domäne Bauwerksmonitoring angewendet. Es besitzt folgende Kernelemente: (i) Konzepte, (ii) Prädikate, (iii) Aktionen sowie (iv) referentielle Ausdrücke. Darin sind *Begriffe* Entitäten mit einer komplexen Struktur, die Attribute in Form von so genannten Slots enthalten. Begriffe repräsentieren die „Objekte“ einer Ontologie und sind mit dem Klassenkonzept der objektorientierten Programmierung vergleichbar. *Prädikate* (predicates) sind Aussagen über den Zustand der Welt, die entweder wahr oder falsch sein

[10] Resource Description Framework
[11] Darpa Agent Markup Language + Ontology Inference Layer
[12] Web Ontology Language
[13] engl.: einheitlicher Bezeichner für Ressourcen, Zeichenfolge mit definierter Formatierung zur Identifikation abstrakter oder physikalischer Ressourcen
[14] Ein leistungsfähiger Ontologie-Editor ist z.B. Protégé [Stanford Center for Biomedical Informatics Research 08], der auch im Rahmen dieser Arbeit zur Erstellung von Ontologien verwendet wurde.

können. *Aktionen* (agent actions) sind Erweiterungen der Begriffe zur formalen Beschreibung von Agentenaktionen. *Referentielle Ausdrücke* (identifying referential expressions — IRE) erlauben es schließlich, eine Menge von Objekten zu definieren, die eine bestimmte Bedingung erfüllen. Dabei ist es möglich, IRE-Quantifizierer[15] in Verbindung mit Prädikaten und Variablen zu verwenden, um komplexe Ausdrücke zu formulieren.

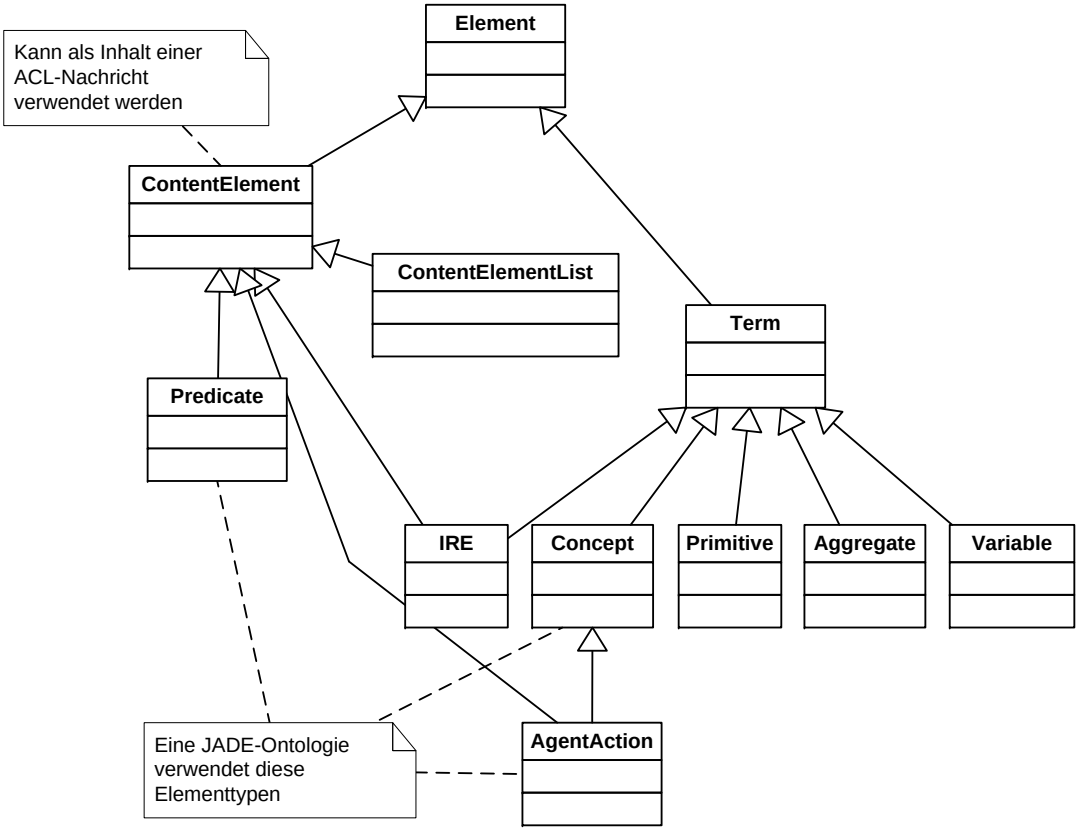


Abbildung 3.7: Inhalts-Referenzmodell der Agentenplattform JADE [Bellifemine 07]

Üblicherweise sind viele Wissensingenieure an der Erstellung von Ontologien beteiligt, um eine vollständige Beschreibung der Fachdomäne zu erhalten. Durch die Vielzahl der Beteiligten und den Anspruch der Vollständigkeit ist die Erstellung von Ontologien häufig ein langwieriger Prozess und insbesondere die Verknüpfung von verschiedenen Ontologien ist ein Problem, das bis heute nicht befriedigend gelöst wurde [Ziegler 07].

3.4 Agentenorientierte Software-Entwicklung (AOSE)

Die Entwicklung von Multiagentensystemen beruht i. Allg. auf einem *Bottomup*-Ansatz, der die Identifikation von Agententypen, die Agentenverantwortlichkeiten und die Agentenkommunikation in den Mittelpunkt des Systementwurfes stellt. Um diesen Ansatz gezielt zu unterstützen und das volle Potential der Agententechnologie auszuschöpfen, wurden spezfische Methodologien zur Entwicklung agentenorientierter Software erarbeitet. Im folgenden Unter-

[15] FIPA SL erlaubt die Quantifizierer `iota`, `all`, `any` und `some`.

abschnitt wird deshalb ein kurzer Überblick über agentenorientierte Entwicklungsmethodologien gegeben. Im darauf folgenden Unterabschnitt wird dann die Standardisierung auf dem Gebiet der agentenorientierten Softwareentwicklung erläutert, die im wesentlichen durch die Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) erarbeitet wurde.

3.4.1 Entwicklungsmethodologien

In der agentenorientierten Softwareentwicklung existieren derzeit zahlreiche Methodologien[16] für die Entwicklung von Multiagentensystemen. Zur Auswahl einer geeigneten Entwicklungsmethodologie für die Realisierung des Bauwerksmonitoringsystems wurde ein Vergleich der wichtigsten agentenorientierten Entwicklungsmethoden durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass die einzelnen Ansätze und Konzepte sehr unterschiedlich sind, da entweder eine bestimmte Agentenarchitektur oder -technologie vorausgesetzt wird. Analog zu [Wooldridge 01] lassen sich die verschiedenen Methodologien aufgrund der ihnen zugrunde liegenden Ansätze grob unterteilen in Methodologien, die durch die objektorientierte Software-Entwicklung beeinflusst sind und bestehende OO-Methodologien entweder erweitern oder für die AOSE adaptieren (z.B. [Wooldridge 00; Zambonelli 03]) und Methodologien, die auf Ansätzen und Modellierungstechniken aus der Wissensverarbeitung (engl. knowledge engineering) aufbauen (z.B. in[Brazier 95] oder [Iglesias 98]).

Für diese Arbeit wurde die an OO-Methodologien angelehnte, und speziell auf die Agentenplattform JADE (vgl. Unterabschn. 3.4.3) abgestimmte JADE-Methodologie [Nikraz 06] gewählt, da diese nicht an eine Zieldomäne gebunden ist, auf eine proprietäre grafische Notation verzichtet und sowohl mit der grafischen Modellierungssprache Unified Modeling Language (UML) als auch der UML-Erweiterung Agent Unified Modeling Language (AUML) gut kombinierbar ist. Die JADE-Methodologie legt einen mehrschrittigen iterativen Arbeitsprozess fest, in dem mehrere Artefakte (Diagramme und Tabellen) zur formalen Spezifikation entwickelt werden (vgl. Abb. 3.8). Die wichtigsten Artefakte sind ein *Anwendungsfalldiagramm*, das alle identifizierten Anwendungsfälle für das System enthält, ein *Agentendiagramm*, das die Agenten, die menschlichen Nutzer, die Ressourcen des Systems und die Bekanntschaften zwischen den Agenten zeigt, eine *Verantwortlichkeitentabelle* mit den Verantwortlichkeiten der einzelnen Agenten, eine *Interaktionentabelle* zur Beschreibung von Interaktionen zwischen den Agenten und eine *Ontologie* für die betrachtete Domäne.

3.4.2 FIPA-Standards

Die Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) [FIPA 07] ist ein internationales, nichtkommerzielles Standardisierungsgremium, das sich mit agentenbasierten Technologien und deren Interoperabilität befasst. Die FIPA hat bis heute 25 Spezifikationen als „Standard“ verabschiedet, die spezifische Aspekte der Multiagentensysteme aus den Bereichen Agentenkommunikation (agent communication), Agententransport (agent transport), Agentenverwaltung (agent management), Architektur (abstract architecture) und Anwendungen (applications) behandeln. Das Hauptaugenmerk liegt dabei nicht auf dem agentenorientierten Entwicklungsprozess (s.o.), sondern auf der Implementierung und physischen Verteilung von Agentensystemen.

Ein mit den FIPA-Spezifikationen konformes Agentensystem besteht aus den Hauptkomponenten Agent Platform (AP), Agent Management System (AMS), Directory Facilitator (DF) und Message Transport System (MTS). Die *Agent Platform* ist die Agentenlaufzeitumgebung,

[16] Eine Methodologie wird hier als ein Bündel von Methoden definiert.

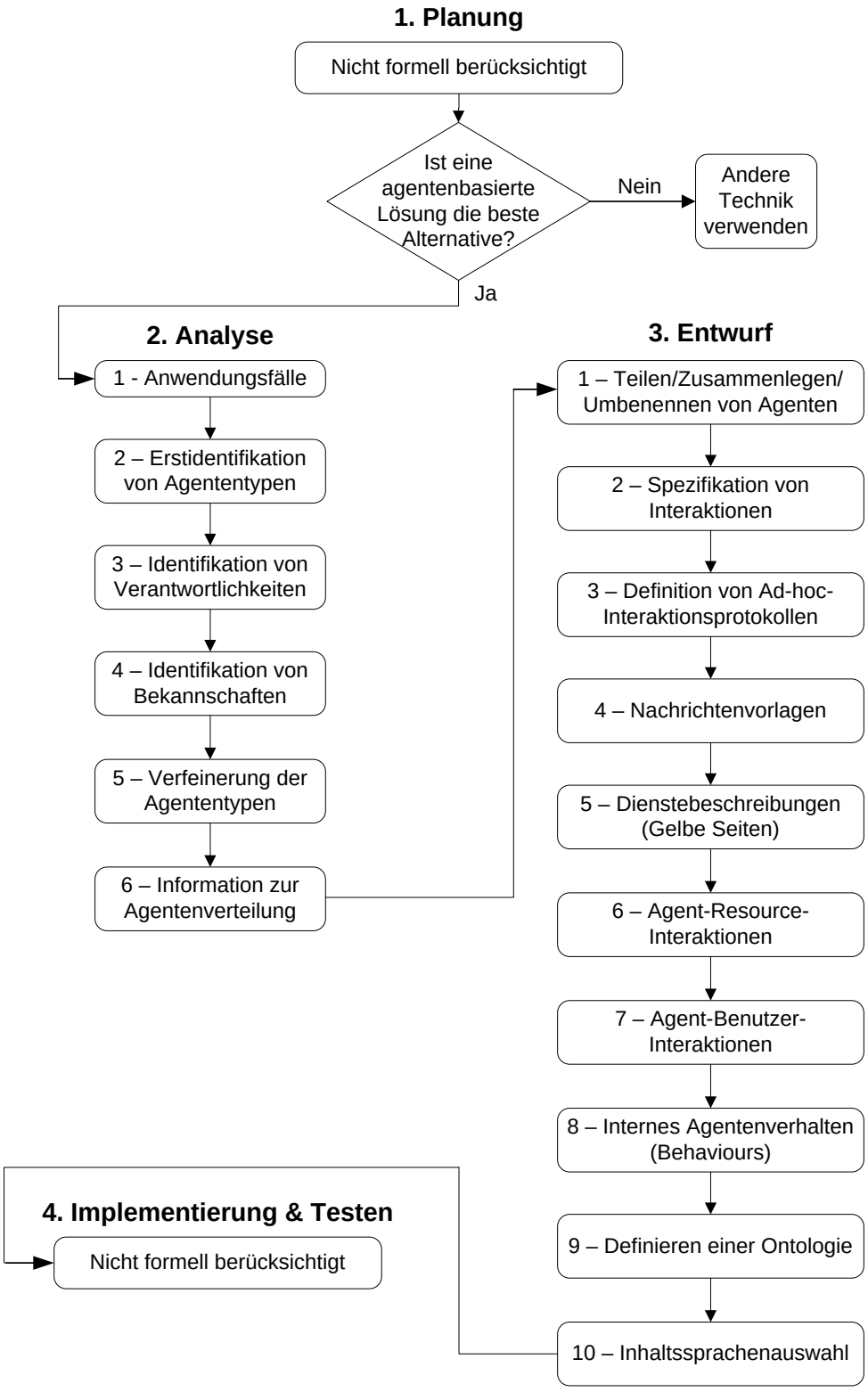


Abbildung 3.8: Einzelschritte der JADE-Entwicklungsmethode [Nikraz 06]

in der die Agenten des Systems ausgeführt werden können. Die AP stellt die physikalische Infrastruktur bereit, in die die Agenten verteilt werden können und besteht aus den Rechnern, Betriebssystemen, Verwaltungskomponenten, den Agenten selbst und zusätzlicher Software. Das *Agent Management System* ist eine obligatorische Komponente des Agentensystems, die für die Verwaltung und den Betrieb des Agentensystems verantwortlich ist. Jeder Agent muss sich beim AMS registrieren, um einen eindeutige Adresse, den Agent Identifier (AID), zu erhalten. Diese Adresse wird vom AMS in einem Verzeichnis aller Agenten und ihrer Zustände verwahrt. Der *Directory Facilitator* ist ein Gelbe-Seiten-Dienst, der es den Agenten des Systems erlaubt, Dienste zu veröffentlichen und/oder zu erfragen. Das *Message Transport System* gewährleistet schließlich den Nachrichtentransport zwischen den Agenten. Die Nachrichten müssen einen vorgegebene Struktur besitzen, die z.B. einen Umschlag (engl.: envelope) mit Informationen über den Empfänger vorschreibt.

3.4.3 Agentenplattform JADE

Das Java Agent DEvelopment Framework (JADE) [JADE 08] ist eine Open-Source-Agentenplattform, die 1998 am Centro Studi E Laboratori Telecomunicazioni (CSELT) entwickelt wurde und seit Februar 2000 von der italienischen Telekom und einer großen Entwicklergemeinde als Open-Source-Projekt aktiv weiterentwickelt wird. Besonders hervorzuheben ist die Konformität von JADE mit den FIPA-Standards (vgl. Abschn. 3.4.2).

In ihrem Kern ist JADE eine vollständig auf Java (und zahlreichen Java-Technologien, insbesondere RMI[17]) basierende Middleware, die die Implementierung von Multiagentensystemen vereinfacht, indem sie eine Reihe von grafischen Werkzeugen zur Überwachung und Verwaltung von Agenten bereitstellt. Agenten können z.B. über eine grafische Benutzungsschnittstelle, den Remote Monitoring Agenten (RMA), verteilt, gestartet und gestoppt werden (s. Abb. 3.9).

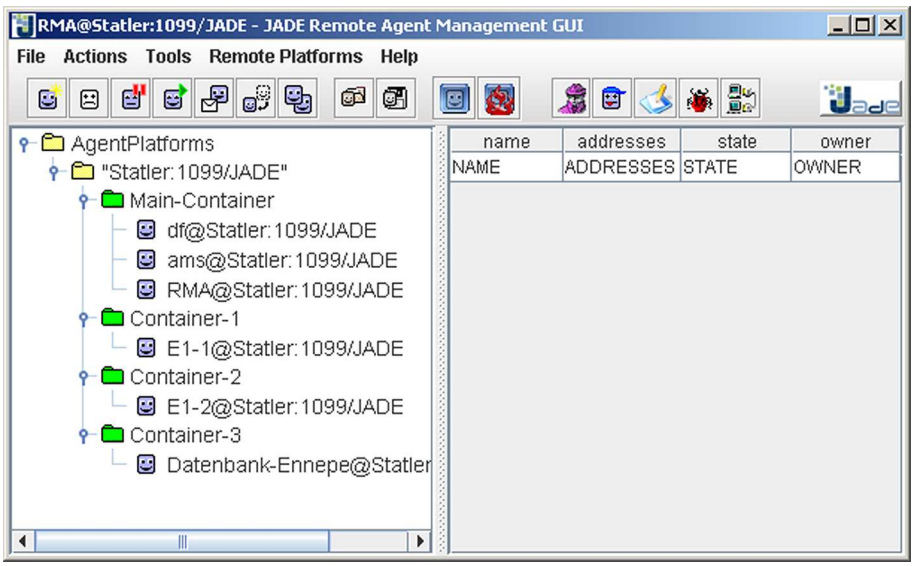


Abbildung 3.9: Grafische Benutzungsschnittstelle von JADE

Ein JADE-basiertes Agentensystem ist in Agenten, Container und Plattformen strukturiert. Container bilden die direkte Ausführungsumgebung für Agenten, wobei die Container einer

[17]Remote Method Invokation, Java-Klassenbibliothek und Kommunikationsprotokoll für den entfernten Methodenaufruf

Plattform unabhängig vom Betriebssystem über mehrere Rechner verteilt sein können. Jede Plattform hat einen besonderen Container, den Main-Container, in dem die von den FIPA-Spezifikationen geforderten Verwaltungs- und Verzeichnisdienste (Agent Management System und Directory Facilitator) implementiert sind.

In JADE werden Agenten als eigener Thread realisiert. Das Verhalten eines Agenten wird in Verhaltensbausteinen, sog. Behaviours, definiert, wobei ein Agent mehrere Verhaltensbausteine (Behaviours) haben kann. Eine echt parallele Aufgabenbearbeitung auf der Basis dieser Behaviours ist jedoch nicht möglich, da alle Behaviours innerhalb des Agenten-Threads ausgeführt werden müssen. Das JADE-Rahmenwerk bietet jedoch eine nicht-präemptive, kooperative Zeitablaufsteuerung (engl. cooperative scheduling), sodass nach Beendigung eines Behaviours automatisch das nächste wartende Behaviour ausgeführt wird.

Derzeit sind zahlreiche Pakete verfügbar, die den JADE-Kern um zusätzliche Funktionalitäten wie Sicherheit, Persistenz und plattformübergreifende Agentenmobilität erweitern. Im Rahmen dieser Arbeit wurden beispielsweise die Erweiterungen JADE-LEAP [Bellifemine 07] und JADE Test Suite [JADE 08] zur Entwicklung des Multiagentensystems eingesetzt.

3.5 Entwicklungsstand von Agentensystemen im Bauingenieurwesen

Multiagentensysteme werden im Bauingenieurwesen vorwiegend als informatischer Lösungsansatz für die computerunterstützte Gruppenarbeit, das Computer Supported Collaborative Work (CSCW), sowie für die verteilte Simulation eingesetzt.

Wichtige Grundlagen zur Anwendung von Agenten- und Multiagentensystemen im Bauingenieurwesen wurden im kürzlich abgeschlossenen DFG-Schwerpunktprogramm 1103 „Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau“ erarbeitet. Die Arbeitsgruppe Agentensysteme [Hartmann 07] beschäftigte sich dabei mit der Frage, wie die vernetzt-kooperativen Probleme des Bauingenieurwesens rechnerbasiert abgebildet und gelöst werden können. Dort konnte erstmalig die grundsätzliche Eignung des Multiagentensystemansatzes zur Lösung typischer Probleme des Bauingenieurwesens wie den Brandschutz, die verteilt-kooperative Tragwerksplanung und die numerische Simulation nachgewiesen werden. An den beteiligten Lehrstühlen in Bochum, Darmstadt und Bonn wurden dazu Referenzimplementierungen auf der Basis der Multiagenten- bzw. der Peer-to-Peer (P2P)-Technologie realisiert.

Für den baulichen Brandschutz realisierte Theiß [Theiß 05] ein Multiagentensystem, mit dem die zugrundeliegenden vernetzt-kooperativen Arbeitsprozesse agentenorientiert abgebildet werden und die Systemnutzer durch Agenten mit Fachwissen gezielt unterstützt werden. Das Multiagentensystem besteht aus drei wesentlichen Agententypen: einem (i) stationären Wrapper-Agenten zur Integration von Fachinformationen und vorhandenen Fachanwendungen, einem (ii) mobilen Transportagenten zur Informationsübertragung und -recherche, sowie einem (iii) mobilen Verarbeitungsagenten zur Überprüfung der Anforderungen des baulichen Brandschutzes. Für den Austausch der relevanten Informationen (Gebäudemodelle) wurden existierende Standards (Industry Foundation Classes) in das Multiagentensystem integriert. Der für die Überprüfung der Anforderungen verantwortliche Agententyp bildet das Brandschutzwissen ab, indem die Fakten aus den Modellen der Fachplaner gemeinsam mit den bereitgestellten Regeln der Brandschutzverordnungen verarbeitet werden.

Für die Tragwerksplanung entwickelte Bilek in [Bilek 06] ein kooperationsunterstützendes Multiagentensystem, in dem die Gesamtlösung der verteilt-kooperativen Planungsaufgabe

schrittweise durch mehrere Agententypen erfolgt, die auf der Basis eines formalisierten Planungsprozesses zur Problemlösung miteinander interagieren. Das Zusammenspiel der Fachplaner, Softwareagenten und den eingesetzten planungsspezifischen Ressourcen wurde auf der Basis eines hierarchischen *Drei-Ebenen-Ansatzes* gelöst (vgl. Abb. 3.10).

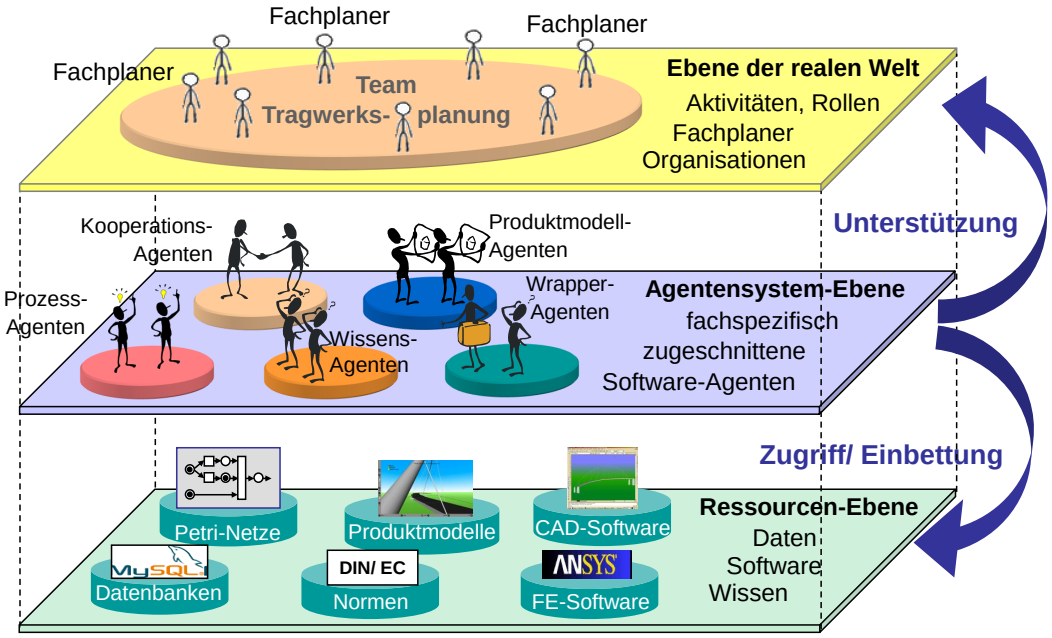


Abbildung 3.10: Drei-Ebenen-Modell aus [Bilek 06]

Auf der *Ebene der realen Welt* befinden sich dabei die menschlichen Aufgabenträger, die auf der nächst tieferen Ebene, der *Agentensystem-Ebene*, durch mehrere Software-Agenten in ihren Planungstätigkeiten zielgerichtet und effektiv unterstützt werden. Auf der untersten Ebene, der *Ressourcen-Ebene*, wurden die notwendigen planungsrelevanten Ressourcen, wie z.B. spezifische Ingenieur- oder Standardbürosoftware und Produktdatenmodelle, angeordnet. Der Planungsprozess wurde auf der Basis dieses Grobkonzepts durch mehrere Teilmodelle für die planungsrelevanten Teilaspekte Kooperation, Produktmodellierung, Prozessunterstützung, Software- und Wissensintegration abgebildet. Die für die Teilmodelle entwickelten Agententypen lassen sich in Kooperations-, Workflow-, Produktmodell-, Fachdomänen- und Wrapper-Agententypen kategorisieren. Das vorgestellte Konzept zur Unterstützung der menschlichen Beteiligten durch fachspezifisch zugeschnittene Agententypen wurde in der vorliegenden Arbeit unter anderem bei der Integration aufgegriffen (vgl. Kap. 4).

Auf dem Gebiet der verteilten Simulation wurde von Ruben [Ruben 05] ein Multiagentensystem für die dynamisch verteilte, numerische Simulation von Baugrund-Tragwerks-Interaktionen entwickelt. Das entwickelte Multiagentensystem PAR.A.FEM (PARallele Agenten FEM) wurde mittels zweier Agententypen über mehrere Rechner verteilt. Ruben unterscheidet zwischen zwei Agententypen: einem (i) stationären Host- und einem (ii) mobilen Client-Agententypen. Der Host-Agententyp wird auf einem beliebigen Rechner gestartet und erzeugt daraufhin eine vorgegebene Anzahl von mobilen Client-Agenten, die nach dem Einlesen spezifischer Informationen auf einen zur Verfügung stehenden Rechner migrieren. Die parallele Berechnung wird von den Client-Agenten durchgeführt, die bei Bedarf miteinander kommunizieren.

Ein ähnliches Konzept nutzte Wellmann Jelic [Wellmann-Jelic 07] zur Parallelisierung von numerischen Simulationen für zeitabhängige Zuverlässigkeitsanalysen. Das Multiagentensys-

tem wurde ebenfalls aus zwei wesentlichen Agententypen, den generischen Master- und Slave-Agententypen, aufgebaut, die parallel ausführbare Berechnungsaufgaben verwalten bzw. lösen [Wellmann Jelic 05]. Der Master-Agent initialisiert — auf der Basis der Benutzervorgaben — eine Anzahl von Slave-Agenten. Die Slave-Agenten werden dann vom Master-Agenten veranlasst, auf einen bestimmten Rechner zu migrieren. Danach verteilt ein Modul für dynamisches Load Balancing die einzelnen Berechnungsaufgaben an die Slave-Agenten. Diese führen dann die ihnen zugewiesenen Berechnungen durch und übermitteln dem Master-Agenten die Berechnungsergebnisse. Nachdem alle Berechnungsaufgaben abgearbeitet sind, ist die parallele Berechnung abgeschlossen. Die Slave-Agenten werden daraufhin gelöscht.

Smarsly [Smarsly 08] realisierte ein Multiagentensystem, das die wirtschaftliche Unterhaltung und Sanierung von Ingenieurbauwerken unterstützt. Dies wird durch eine permanente autonome Bauwerksüberwachung auf der Basis einer intelligenten Sensorik erreicht.

Ausserhalb des Bauingenieurwesens kommen Multiagentensysteme in zahlreichen industriellen Anwendungen zum Einsatz, u.a. zur Prozesssteuerung [Jennings 94], Systemdiagnose [Albert 03], zum Netzwerkmanagement [Greenwood 06] sowie zur Optimierung der Transportlogistik [Neagu 06]. Ein zunehmend wichtiges Anwendungsfeld für Multiagentensysteme ist das Informationsmanagement. Insbesondere das Internet hat die Nutzung von Multiagentensystemen vorangetrieben und sich aufgrund der großen Datenmenge als ein ideales Anwendungsfeld für Multiagentensysteme erwiesen. Agenten wurden z.B. zum Durchsuchen und Filtern dieser Massendaten entwickelt [Klusch 01].

Teil II

Konzept

Kapitel 4

Entwicklung eines Konzeptes für das agentenbasierte Bauwerksmonitoring

In diesem Kapitel wird ein verteilter Monitoringablauf exemplarisch für das vorliegende Monitoringproblem analysiert und darauf aufbauend das zu entwickelnde Bauwerksmonitoringsystem auf der Grundlage einer agentenorientierten Entwicklungsmethodologie entworfen.

4.1 Analyse eines verteilten Monitoringablaufs

Die Hauptzielsetzung dieser Arbeit besteht in der Entwicklung eines verteilten Bauwerksmonitoringsystems, das die Monitoringbeteiligten besser als bisher in der kollaborativen Erfassung und Auswertung von Messdaten aus dem Bauwerksmonitoring unterstützt. Zur Entwicklung des Bauwerksmonitoringsystems wird das vorliegende Monitoringproblem in den folgenden Unterabschnitten zunächst beschrieben und aus informatischer Sicht analysiert.

4.1.1 Problembeschreibung

Das Monitoring von Bauwerken ist eine interdisziplinäre Mess- und Auswertungsaufgabe, die von einer Gruppe von Fachexperten arbeitsteilig durchgeführt wird. Bei einer Minimalauslegung des Monitorings sind an der Monitoringaufgabe mindestens drei Akteure beteiligt [Sustainable Bridges 07]: der *Betreiber bzw. Besitzer* des Bauwerks, der die Monitoringziele festlegt und für wirtschaftliche Entscheidungen hinsichtlich des Bauwerksmonitorings sowie der Bauwerksinstandsetzung verantwortlich ist, der *(Prüf-)Statiker*, der ein theoretisches Bauwerksmodell und/oder geeignete Methoden zur Auswertung der gewonnenen Messdaten entwickelt und der *Monitoringexperte*, der in Abstimmung mit dem Statiker das Bauwerksmonitoringsystem entwirft und betreibt.

In Abhängigkeit von der Bauwerksart und den jeweiligen Monitoringzielen können aber deutlich mehr Akteure in das Monitoring involviert sein. Insbesondere dann, wenn das Bauwerksmonitoring mit dem Ziel der Sicherheitsbewertung durchgeführt wird, werden weitere Experten aus Fachgebieten wie Geotechnik und Grundbau, Geodäsie, Materialtechnologie und Spezialisierungen des konstruktiven Ingenieurbaus an der Auswertung der Messdaten beteiligt. Die Erfassung und Auswertung erfolgt dabei kollaborativ in einem mehrschrittigen,

bauwerksspezifischen Arbeitsablauf (4.1.2), dem die Messdaten aus dem Bauwerksmonitoring sowie weitere Daten (Bauwerksdaten, Inspektionsdaten, etc.) zugrundegelegt werden.

In dieser Arbeit soll deshalb — unter Berücksichtigung eines exemplarisch betrachteten Arbeitsablaufs — untersucht werden, wie das Bauwerksmonitoring im Sinne einer verteilten Problemlösung zerlegt werden muss, um die verantwortlichen menschlichen Aufgabenträger optimal in der Erfassung und Auswertung von Messdaten zu unterstützen. Die Problemstellung besteht grundsätzlich darin, den Überwachungsbeteiligten lokal gespeicherte, aber auch fernabfragbare Messdaten aus elektronischen Messwertgebern bereitzustellen und die verteilt ablaufenden Arbeitsschritte zur Weiterverarbeitung der Messdaten sinnvoll zu vernetzen [Hartmann 01]. Das zu entwickelnde Softwaresystem soll dazu mehrere Agenten verwenden, die als autonome Softwarekomponenten mit eigenen Zielen, Ressourcen, Fähigkeiten sowie einem definierten Verständnis über ihre Anwendungswelt versehen sind und mit anderen Agenten bzw. menschlichen Auftraggebern interagieren können.

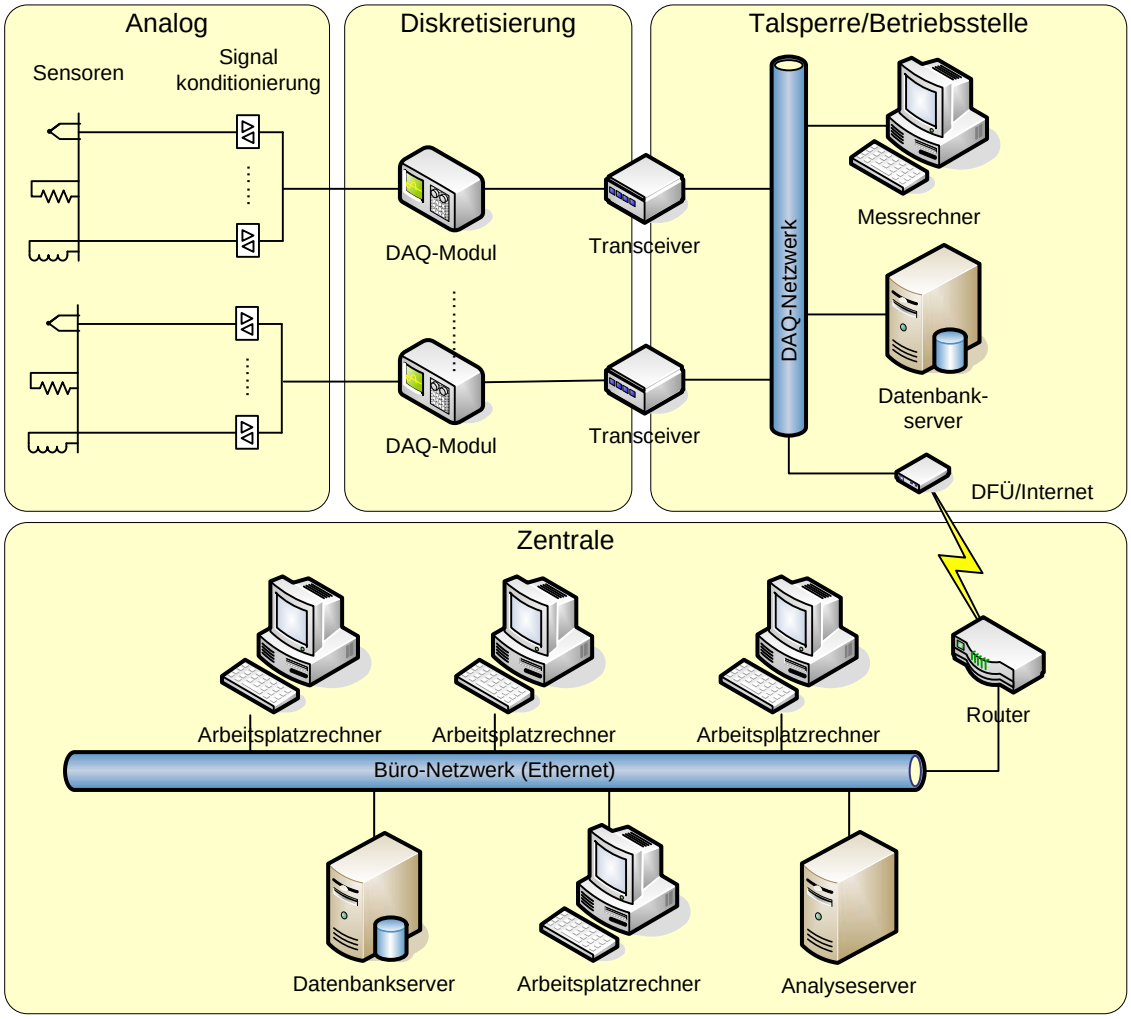


Abbildung 4.1: Angestrebtes verteiltes Monitoringsystem mit integrierten Mess- und Datenerfassungssystemen (Sytemskizze)

Das angestrebte verteilte Monitoringsystem ist in Abbildung 4.1 skizziert. Das Monitoringsystem soll sich über das lokale Datenerfassungsnetzwerk (DAQ-Netzwerk) an der Betriebsstelle bzw. Talsperre sowie das Büronetzwerk der Zentrale erstrecken. Auf diese Weise werden die Messwertgeber und Messdaten für alle Monitoringbeteiligte verfügbar gemacht, sodass von

den Arbeitsplatzrechnern auf die lokal gespeicherten Daten sowie die Datenerfassungssysteme zugegriffen werden kann. Dieser Ansatz geht über den Umfang bestehender computerbasierter Monitoringsysteme (vgl. hierzu Abb. 2.7) hinaus, da das Monitoringsystem als verteiltes System nun auch die Arbeitsplatzrechner der Monitoringbeteiligten umfasst und von dort aus einen integrierten Zugriff auf die Systemkomponenten ermöglicht.

Vor dem Hintergrund des teilweise hohen Automatisierungsgrades im Bauwerksmonitoring muss dabei erforscht werden, wie die im Bauwerksmonitoring verwendeten autonomen Mess- und Datenerfassungssysteme auf generische Weise in das zu entwickelnde Multiagentensystem eingebunden werden können. Konkret geht es darum, einen Zugriff auf Systeme unterschiedlicher Hersteller — unabhängig von den gerätespezifischen Befehlssätzen und den proprietären Kommunikationsprotokollen — zu ermöglichen, sodass die elektronischen Messwertgeber und Datenerfassungssysteme für die Überwachungsbeteiligten über das Internet dynamisch auffindbar, zugreifbar und steuerbar werden. Das primäre Ziel ist hierbei, eine Infrastruktur zur verteilten Erfassung und Bereitstellung von Messdaten zu entwickeln. Weiterhin ist auch zu berücksichtigen, dass die Speicherung von Messdaten vorwiegend in lokalen Datenbanken erfolgt und die verteilt gespeicherten Messdaten für die Überwachungsbeteiligten zugreifbar sein müssen.

Schließlich soll auch untersucht werden, wie die Verarbeitung und Auswertung der durch das Bauwerksmonitoring erhobenen Messdaten computerbasiert unterstützt werden kann. Die laufende Erfassung von Bauwerkphänomenen produziert — vor allem bei der Messung von dynamischen Prozessen — eine große Datenmenge, die gezielt gefiltert, umgewandelt und aufbereitet werden muss, um für die weitere Verarbeitung nützlich zu sein. Da dieser Arbeitsschritt ohne eine geeignete Computerunterstützung einen hohen manuellen Arbeitsaufwand erzeugen kann, sollen in dem zu entwickelnden Multiagentensystem geeignete Methoden zur Datenverarbeitung und -analyse verfügbar sein. Die Analysemethodik muss hierbei idealerweise die Auswirklungen sich ändernder Umgebungs- und Betriebsbedingungen auf das Bauwerksverhalten berücksichtigen, um anormale Bauwerkszustände und schleichende zeitabhängige Schädigungsprozesse erkennen zu können.

4.1.2 Monitoringablauf

Als Grundlage für die Entwicklung eines Bauwerksmonitoringsystems wird ein exemplarischer Monitoringablauf analysiert, der in der Praxis zur messtechnischen Dauerüberwachung von Talsperren durchgeführt wird. Beispielhaft betrachtet wird der Überwachungs- und Kontrollbetrieb der Ennepetalsperre [Wikipedia 08, „Ennepetalsperre“]. Verantwortlich für den Betrieb der Ennepetalsperre ist der Ruhrverband, ein regionaler Wasserwirtschaftsverband mit Hauptsitz in Essen, dessen Hauptaufgabe die Wasserbewirtschaftung der Ruhr ist [Ruhrverband 08]. Hierzu betreibt der Ruhrverband ein System von Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr, zu dem neben der Ennepetalsperre u.a. die Bigge-, Möhne- und Sorpetalsperre gehören. Die Ennepetalsperre dient in der Folge als Referenzbauwerk.

Zur optimalen Wasserbewirtschaftung der Ruhr wird das Talsperrensystem des Ruhrverbands von Essen aus zentral gesteuert und betreut. Dort wurde eine Leitzentrale eingerichtet, zu der alle maßgebenden betrieblichen Daten (Abflusspegelstände, Niederschläge) fernübertragen werden und zu einem gemeinsamen Lagebild aufbereitet werden. Der örtliche Betrieb der Talsperren ist in mehreren Betriebsstellen organisiert, die sich in der Nähe der Talsperren befinden. Die Betriebsstellen werden i.d.R. von einem Diplom-Ingenieur geleitet und verfügen über weiteres Personal vor Ort, das für die Regelung der Abgaben, die visuelle Kontrollen

und die Ablesung der nicht automatisierten Mess- und Kontrolleinrichtungen verantwortlich ist sowie Wartungsarbeiten an den Wasserbauten durchführt [Rißler 98].

Die Überwachung der Talsperren wird von einer eigenen Abteilung („Talsperrenüberwachung und Geotechnik“), die aus Bauingenieuren, Geodäten und Geologen besteht, in Zusammenarbeit mit den lokalen Betriebsstellen durchgeführt. Die Abteilung übernimmt alle weiterführenden Aufgaben der Talsperrenüberwachung, wie die Erstellung von Berichten, Sicherheitsbeurteilungen oder statischen Nachweisen im Rahmen von Sanierungs- und Anpassungsmaßnahmen, und ist insbesondere für die Auswertung aller vor Ort erfassten Messdaten verantwortlich. Ein Großteil der Messdaten wird zur Weiterverarbeitung von den Betriebsstellen in die Zentrale transferiert, wobei der Datentransfer überwiegend manuell mittels einer üblichen Fernzugriffssoftware oder per Email erfolgt. Der zur Überwachung der Ennepetalsperre durchgeführte Monitoringablauf ist in Abb. 4.2 als UML-Aktivitätsdiagramm dargestellt.

Der Monitoringablauf beginnt mit der Datenerfassung an der Betriebsstelle Ennepetalsperre durch ein automatisiertes Datenerfassungssystem. Das Datenerfassungssystem besteht aus ca. 40 Messfühlern, drei Datenloggern und einem Messrechner, der sich in einer Messwarte in der Nähe der Talsperre befindet. Die Messfühler werden von den Datenloggern nach einem programmierten Messprogramm in festen Intervallen abgefragt. Eine Software liest die Datenloggerspeicher regelmäßig aus und legt die erfassten Messdaten in Dateien auf dem Messrechner ab. Werte aus weiteren, nicht automatisierten Messeinrichtungen werden entweder mittels Handheld-Computern oder manuell durch Ablesung analoger Messinstrumente erfasst.

Die Rohdaten werden nach ihrer Erfassung zunächst durch den Talsperrenmeister in Dateiform aufbereitet und auf ihre Plausibilität kontrolliert. Hierzu werden die Daten in ein Tabellenkalkulationsprogramm eingelesen und grafisch aufbereitet. Weitere, aus der manuellen Erfassung stammende Messdaten werden manuell in ein Tabellenkalkulationsprogramm eingelesen und ebenfalls aufbereitet. Nach der Kontrolle durch den Talsperrenmeister werden die Messdaten in Dateiform an den Talsperreningenieur weitergeleitet, der anhand der Daten das Bauwerksverhalten über einen kurzen Zeitraum (eine Woche bis max. ein Monat) grob prüft. Bei der Prüfung werden auch Daten aus der manuellen Erfassung berücksichtigt. Die Daten werden dann vom Talsperreningenieur gespeichert, wobei die Speicherung der Daten im Dateiformat des verwendeten Tabellenkalkulationsprogramms oder in flachen Dateien erfolgt. Dieser Arbeitsschritt wird 14-täglich oder monatlich ausgeführt.

Die weitergehende Auswertung der Messdaten erfolgt dann in der Essener Zentrale des Ruhrverbands. Techniker und Ingenieure übertragen die in Dateiform vorliegenden Messdaten in das jeweils zur Auswertung verwendete Tabellenkalkulationsprogramm und bereiten die Daten in der gewünschten Zieldarstellung auf. Die manuell erfassten Messdaten werden zur Weiterverarbeitung ebenfalls in ein Tabellenkalkulationsprogramm eingegeben. Der Austausch von Informationen bzw. die Weitergabe der Dateien zwischen den Überwachungsbeteiligten erfolgt per Email oder per Datenträger. An der Auswertung der Messdaten sind verschiedene Fachdisziplinen, insbesondere Geologen und Vermesser, beteiligt. Die Messdaten werden von verschiedenen Überwachungsbeteiligten mit unterschiedlichen Zielsetzungen analysiert und abschließend von einem Statiker/Fachingenieur ausgewertet. Dieser Statiker nimmt eine Sicherheitsbewertung vor und verfasst einen entsprechenden Bericht. Die Auswertung der Messdaten durch den Geologen und Vermesser erfolgt in ca. halbjährlichen Intervallen. Die Sicherheitsbeurteilung und die Berichtserstellung wird jährlich durchgeführt.

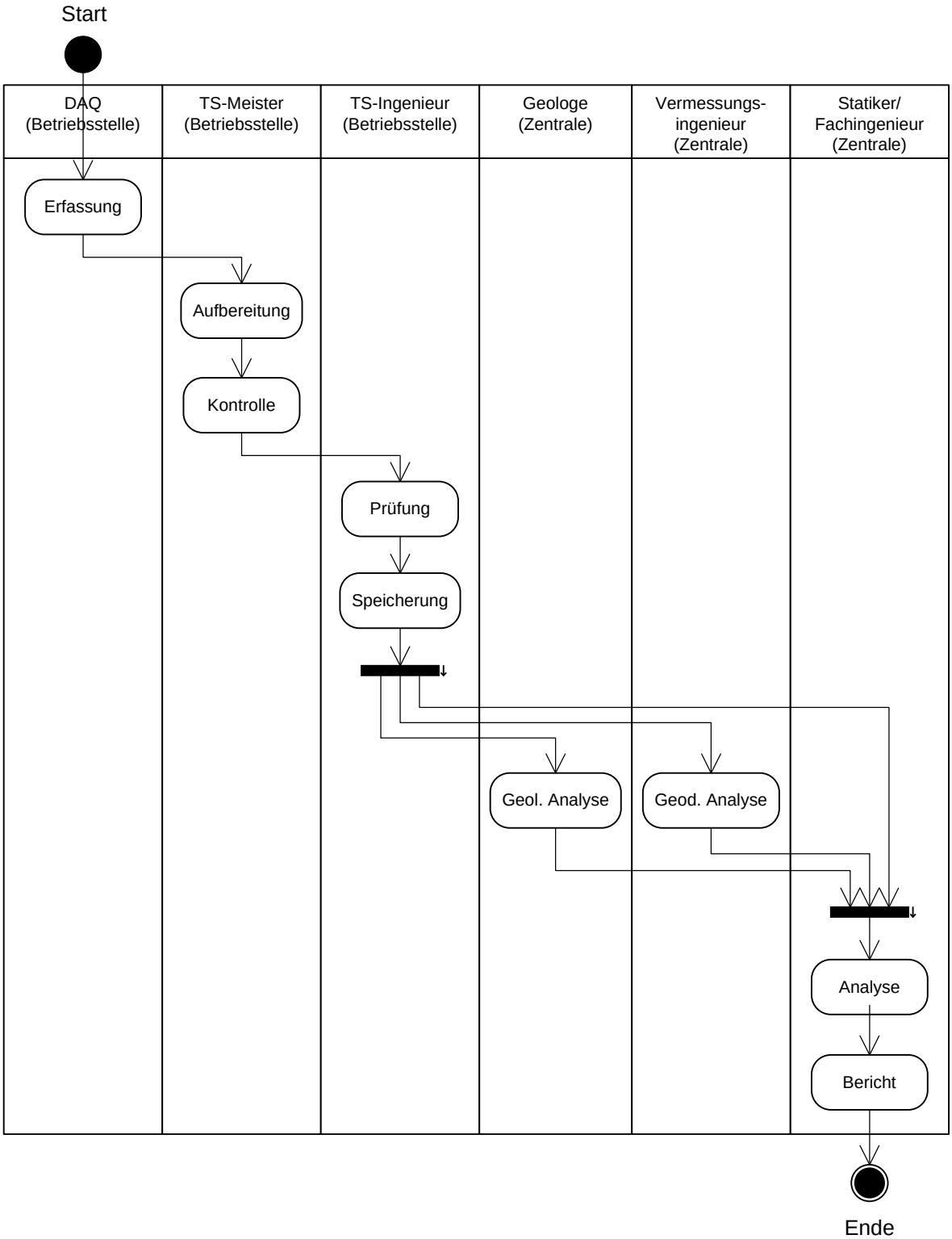


Abbildung 4.2: Beispielhaft betrachteter Monitoringablauf der Ennepetalsperre (UML-Aktivitätsdiagramm)

4.1.3 Formalisierung

Für eine bessere Übertragbarkeit auf andere Bauwerkstypen wie Brücken- oder Tunnelbauwerke wird der Monitoringablauf von bauwerksspezifischen Arbeitsschritten abstrahiert und als ein generischer Prozess formalisiert. Der Monitoringablauf umfasst eine Reihe sowohl manuell als auch automatisiert durchgeführter Arbeitsschritte, die zur Erfassung und Verarbeitung von Messdaten erforderlich sind (vgl. Abb. 4.3).

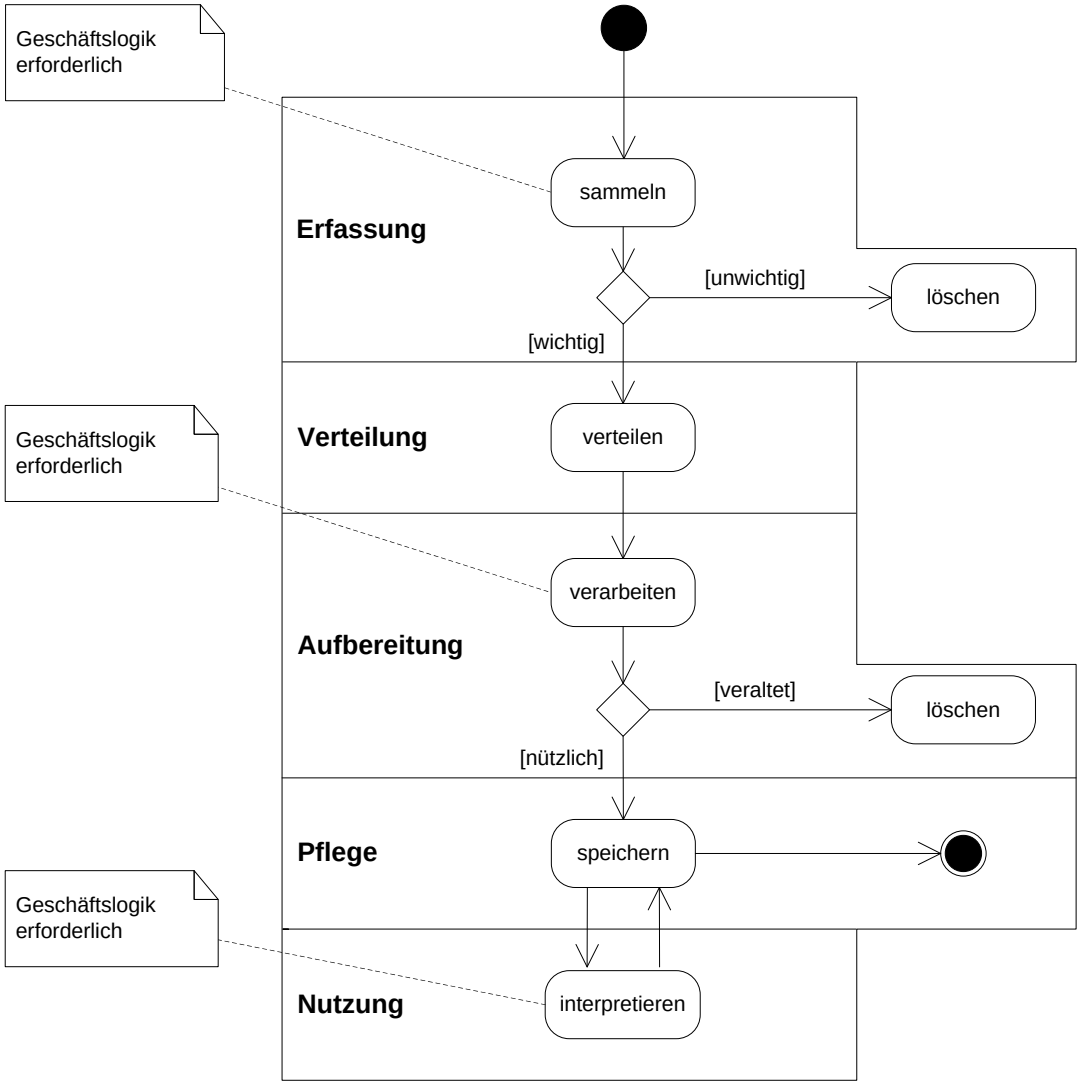


Abbildung 4.3: Monitoringprozess bei Verwendung intelligenter Sensoren (UML-Aktivitätsdiagramm) [Oppliger 06]

Der erste Schritt, die *Erfassung* von Messdaten, beinhaltet zunächst den physikalischen Messvorgang, d.h. die Umwandlung des physikalischen Phänomens in eine messbare Größe und die Digitalisierung des Messwertes. Wenn intelligente Sensoren verwendet werden, findet in diesem Schritt bereits eine Vorauswahl von erfassten Bauwerksphänomenen statt, d.h. es wird entschieden, welche Messwerte wichtig (von Interesse) sind und welche Messwerte unwichtig sind und gelöscht werden können. Dies erfolgt auf der Basis von geeigneter Fachlogik, die

in die Datenerfassungssysteme bzw. Sensoren integriert ist. Bei Verwendung herkömmlicher Sensoren wird diese Entscheidung während der Aufbereitung von Messdaten getroffen.

Der anschließende Schritt, die *Verteilung*, soll auf generische Weise den Transport von Messdaten von einer Datenquelle zu einem Zielort abbilden. Hierbei wird vorausgesetzt, dass die Messdaten bereits aus den Datenerfassungssystemen ausgelesen und in Dateiform auf einem Rechner abgelegt wurden. Konkret geht es also darum, eine entfernt abgelegte Messdatei aufzufinden, einzulesen und auf einem anderen Rechner ablegen.

Die danach folgende *Aufbereitung* von Messdaten wird ebenfalls als ein eigener Arbeitsschritt modelliert. Als Teilschritte sind das Auslesen der Messdaten aus dem Rohdatenformat, die Umwandlung in ein gewünschtes Zielformat und das Schreiben der Messdaten in das gewünschte Zieldatenformat durchzuführen. Vor der Aufbereitung der Messdaten wird häufig auch untersucht, ob die Messdaten für eine weitere Nutzung interessant sind oder ob sie unter Umständen veraltet sind und deshalb gelöscht werden können. In diesem Arbeitsschritt ist zur Umwandlung (Transformation) von Messdaten und zur Unterscheidung zwischen nützlichen und veralteten Daten entsprechende Fachlogik erforderlich.

Der nächste Schritt, die *Pflege*, beinhaltet die persistente Speicherung der Messdaten. In diesem Arbeitsschritt werden alle Aktionen zusammengefasst, die zur Verwaltung von Messdaten ausgeführt werden müssen. Dies sind z.B. die Erzeugung, Aktualisierung, Speicherung und das Löschen von Messdaten.

Der Monitoringablauf beinhaltet als abschließenden Schritt die *Nutzung* von Messdaten. Die Messdaten werden dabei von den Überwachungsbeteiligten interpretiert, d.h. auf der Basis geeigneter Methoden oder Modelle ausgewertet. Dieser Schritt muss deshalb den Export von Messdaten als Eingabe für Statistik- oder Simulationssoftware einschließen. Bei fehlerhaften oder unvollständigen Daten, werden die Messdaten in diesem Schritt bearbeitet, wobei der Monitoringablauf i. Allg. mit der Speicherung der Messdaten endet. Zur Automatisierung dieses Arbeitsschrittes ist ebenfalls umfassende Fachlogik erforderlich.

Wie oben beschrieben wurde, besteht eine Hauptzielsetzung dieser Arbeit in der agentenorientierten Umsetzung dieses Monitoringprozesses. Das Multiagentensystem soll dabei so ausgelegt werden, dass die Schritte des Monitoringprozesses durch das System unterstützt und, soweit möglich, automatisiert durchgeführt werden. Hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass in drei Arbeitsschritten geeignete Fachlogik zur automatisierten Verarbeitung bzw. Auswertung der Messdaten erforderlich ist.

4.2 Agentenorientierte Analyse

In den folgenden Unterabschnitten wird das oben beschriebene Monitoringproblem agentenorientiert analysiert. Hierzu werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Bauwerksmonitoringsystem ermittelt und die Agenten des Systems identifiziert. Der Analyse- und Entwurfsablauf basiert auf der JADE-Methodologie [Nikraz 06], auf die bereits in Abschnitt 3.4 eingegangen wurde. Um den Umfang überschaubar zu halten, wird im Folgenden vereinfachend auf eine vollständige Darstellung aller Iterationsschritte der Analyse verzichtet; stattdessen werden nur die Ergebnisse des jeweils letzten Iterationsschritts dargestellt. Die erstellten Artefakte[1] und Modelle sind vollständig in Anhang C („Artefakte und Modelle aus der Analyse- und Entwurfsphase“) wiedergegeben.

[1] Als Artefakte werden im Folgenden die in der Analyse entwickelten formalen Ergebnisse, wie z.B. Diagramme und Tabellen, definiert.

4.2.1 Anforderungen

Zur Konzeption des Bauwerksmonitoringsystems wird im ersten Schritt eine Liste möglicher Anwendungsszenarien ermittelt. Die Anwendungsszenarien legen den Anwendungskontext für das zu entwickelnde Bauwerksmonitoringsystem aus Anwendersicht, d.h. externer Sicht, fest; sie werden in Form von Anwendungsfällen (use cases) beschrieben.

Tabelle 4.1: Ermittelte Anwendungsfälle des Bauwerksmonitoringsystems

Anwendungsfall	**Kurzbeschreibung**
Messgröße erfassen	Nutzer will Messgröße automatisiert erfassen lassen.
Datenerfassungssysteme steuern	Nutzer will in situ installierte Mess- und Datenerfassungssysteme steuern.
Messdaten ansehen	Nutzer will erfasste Messdaten ansehen.
Messdaten archivieren	Nutzer will Messdaten langfristig speichern. Messdaten sollen über langen Zeitraum gespeichert werden.
Messdaten importieren	Nutzer will in Dateiform vorliegende Messdaten in Bauwerksmonitoringsystem importieren.
Messdaten verwalten	Nutzer will Messdaten verwalten. Hierzu gehört das Erzeugen, Lesen, Aktualisieren und Löschen von Messungen.
Messdaten aufbereiten	Nutzer will Messdaten in Zielformat/Zieldarstellung bringen.
Messdaten auswerten	Nutzer will Messdaten auswerten, z.B. mit statistischen oder strukturmechanischen Modellen.
Anomalien erkennen	Nutzer will bei besonderen Ereignissen wie Unter- oder Überschreiten von Schwellenwerten benachrichtigt werden.

Die Anwendungsfälle orientieren sich dabei an dem in Unterabschnitt 4.1.3 beschriebenen Monitoringablauf und spiegeln die Schritte aus Anwendersicht wider (vgl. Tabelle 4.1): Für den Nutzer steht zunächst die Erfassung von Messgrößen im Vordergrund. Zu diesem Zweck müssen die installierten Mess- und Datenerfassungssysteme gesteuert werden. Nach der Erfassung der Messgrößen werden die Messwerte vom Anwender gesichtet und vom System oder Anwender gespeichert. Weitere Anwendungsfälle befassen sich mit der Verwaltung und Auswertung von Messdaten, dem Import von Daten in das Bauwerksmonitoringsystem und ihrer Aufbereitung in ein Zielformat oder eine Zieldarstellung, z.B. als Diagramm. Die restlichen Anwendungsfälle beinhalten die Auswertung von Messdaten und die Aufdeckung von Anomalien. Dies kann z.B. durch den Vergleich von Messwerten mit zuvor festgelegten Schwellenwerten erfolgen.

Als Nutzer des Bauwerksmonitoringsystems werden die am Monitoringablauf beteiligten Fachexperten, d.h. Talsperrenmeister und Talsperreningenieur, Geologe, Vermessungsingenieur und Fachingenieur/Statiker, identifiziert. Alle Monitoringbeteiligten werden dabei für eine prototypische Umsetzung durch drei generische Nutzer abgebildet: den (i) Monitoringexperte, der als Hauptverantwortlicher für die Steuerung des Bauwerksmonitoringsystems, insbesondere die Verwaltung der Mess- und Datenerfassungssysteme zuständig ist, den (ii) Bauwerksbetreiber/-besitzer, der vorrangig betriebliche Aufgaben wahrnimmt, aber auch an der Messdatenauswertung beteiligt ist sowie den (iii) Fachingenieur/Statiker, der — gemein-

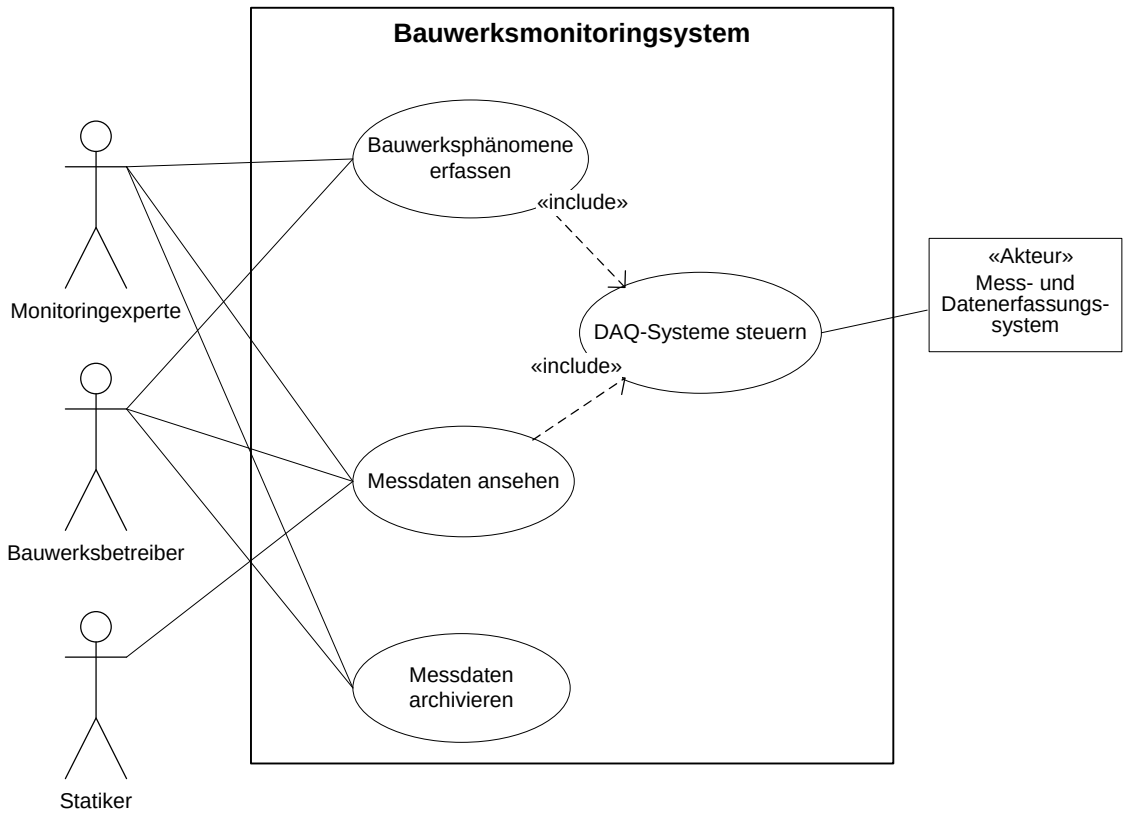


Abbildung 4.4: Anwendungsfälle für das zu entwickelnde Bauwerksmonitoringsystem (UML-Anwendungsfalldiagramm)

sam mit Fachexperten aus anderen Disziplinen — für die Bauwerkssicherheit und eine (abschließende) Sicherheitsbeurteilung verantwortlich ist.

In Abbildung 4.4 ist auszugsweise ein Anwendungsfalldiagramm dargestellt, das drei der oben beschriebenen Anwendungsfälle (Anwendungsfälle „Messgröße erfassen“, „Messdaten ansehen“ und „Messdaten archivieren“) sowie die maßgebenden Nutzer des Bauwerksmonitoringsystems enthält. Das Diagramm zeigt, dass die Steuerung von Datenerfassungssystemen (DAQ-Systeme) ein eigener Anwendungsfall ist, der von den Anwendungsfällen „Messgröße erfassen“ und „Messdaten ansehen“ miteingeschlossen wird. Es ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass die in situ installierten, automatisierten Mess- und Datenerfassungssysteme externe Akteure des Monitoringsystems sind, mit denen das zu entwickelnde Bauwerksmonitoringsystem zur Erfassung von Messgrößen interagieren muss. Der Hauptgrund für die Behandlung der Mess- und Datenerfassungssysteme als externe Akteure ist, dass die Erfassung von Messgrößen mittels Mess- und Datenerfassungssystemen — durch die Erstellung und Übertragung von Messprogrammen — zwar „von außen“ gesteuert werden kann, der Datenerfassungsvorgang auf der Basis der installierten Hardwarekomponenten jedoch weitgehend automatisiert und ohne äußere Kontrolle erfolgt. Aus diesem Grund wird in in Abschnitt 4.5.1 ein eigenes Konzept zur Einbindung von Mess- und Datenerfassungssystemen entwickelt.

Eine ausführliche, formale Beschreibung aller relevanten Anwendungsfälle ist dem Anhang C.1 („Anwendungsfälle“) zu entnehmen.

4.2.2 Erstidentifikation von Agententypen

Die Grobmodellierung eines Multiagentensystems erfolgt durch Erstidentifikation von geeigneten Agententypen und durch Zuweisung von Verantwortlichkeiten an die identifizierten Agententypen. Im Hinblick auf das in dieser Arbeit betrachtete Monitoringproblem, steht zunächst die Abbildung des zugrundeliegenden Monitoringablaufs im Vordergrund der Analyse. Die Identifikation von Agententypen beruht dabei auf dem Grundsatz, dass jeder Arbeitsschritt im Monitoringablauf durch jeweils einen zugehörigen Agententypen abgebildet wird.

Es werden die folgenden Agententypen identifiziert (vgl. Unterabschn. 4.1.3):

- Sensorikagent
- Datenverteilungsagent
- Datenverarbeitungsagent
- Datenspeicherungsagent
- Filteragent
- Berichtsagent
- Statistikagent

Der *Sensorikagent* bildet den ersten Schritt des Monitoringablaufs, die Datenerfassung, ab. Der Agent interagiert mit den Mess- und Datenerfassungssystemen und ermöglicht eine Kommunikation mit den Hardwarekomponenten auf physikalischer Ebene oder, wenn keine bidirektionale Kommunikation vorgesehen bzw. möglich ist, einen Fernzugriff auf die erzeugten Messdaten. Zur Abbildung der Arbeitsschritte „Datenverteilung“ und „Datenverarbeitung“ werden zwei weitere Agententypen, der *Datenverteilungs-* und der *Datenverarbeitungsagent*, eingeführt. Der Datenverteilungsagent hat dabei die Aufgabe, verteilt abgelegte Messdateien aufzufinden und an die verarbeitenden Agenten zu verteilen. Die Daten werden anschließend vom Datenverarbeitungsagent verarbeitet, der die Messdaten umwandelt und mit den Daten ein intern verwendetes Datenmodell erstellt. Der Datenverarbeitungsagent übernimmt auch die Integration proprietärer Datenformate (vgl. Unterabschn. 4.6.2). Die Pflege von Messdaten wird durch den Datenspeicherungsagenten übernommen, wobei dieser Agententyp vorrangig für die Archivierung und Verwaltung von Messdaten verantwortlich ist.

Der letzte Arbeitsschritt des Monitoringablaufs, die Nutzung von Messdaten, wird ebenfalls durch geeignete Agententypen unterstützt. Da die Nutzung von Messdaten stark vom Benutzer sowie dem jeweiligen Zweck des Bauwerksmonitorings und einer Vielzahl von möglichen Auwertungsverfahren abhängig ist, ist dieser Arbeitsschritt nicht sinnvoll automatisierbar. Deshalb werden Agententypen vorgesehen, die zwar nicht die gesamte Datenauswertung, jedoch klar umrissene Teilaufgaben in der Analyse von Messdaten unterstützen. Zu diesen Agententypen zählen ein *Filter-*, ein *Berichts-* und ein *Statistikagent*. Der Filteragent ermöglicht die Einbettung von weiterführender Auswertungslogik in den Monitoringablauf. Um eine automatisierte Verarbeitung von Messdaten umzusetzen und — darauf aufbauend — die Diagnose des Bauwerkszustandes zu unterstützen, werden Datenauswertungs- und Diagnosefähigkeiten in den Agententypen implementiert. Eine zu dieser Thematik durchgeführte Literaturrecherche führte auf das in [Salvaneschi 95] vorgestellte Konzept zur diagnostischen Auswertung von Messdaten, das agentenorientiert aufbereitet und in den Filteragenten integriert wurde. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Auswertung von Messdaten entlang mehrerer Auswertungspfade, die unterschiedliche Verfahren von relativ einfachen schwellenwert-

basierten Verfahren bis zu Kausalnetzen physikalischer Prozesse umfassen. Eine ausführliche Beschreibung des Konzeptes ist in Unterabschn. 4.4.4 zu finden.

Der Berichtsagent übernimmt die Aufbereitung von Messdaten und die Erstellung von Berichten, einem häufig wiederkehrenden Arbeitsschritt in der Auswertung von Messdaten. Der Statistikagent bringt schließlich statistische Funktionen zur Analyse von Messdaten in das Bauwerksmonitoringsystem ein.

Die oben beschriebenen Agententypen werden anschließend durch Ermittlung ihrer Verantwortlichkeiten (Responsibilities) weiter präzisiert. Verantwortlichkeiten beschreiben die Aufgaben eines Agententypen aus interner Sicht und bilden eine geeignete Basis für die Implementierung des Agentenverhaltens. In Tabelle 4.2 sind beispielhaft die Verantwortlichkeiten des Sensorik- und Datenverteilungsagenten dargestellt.

Tabelle 4.2: Verantwortlichkeiten des Sensorik- und Datenverteilungsagenten

Agententyp	**Verantwortlichkeiten**
Sensorikagent	1. Kommuniziert mit DAQ-System. 2. Erfasst Messgrößen zeitgesteuert. 3. Liefert auf Anfrage gespeicherte Messdaten des DAQ-Systems. 4. Schreibt die Messwerte in eine Datei. 5. Liefert auf Anfrage den Speicherort der Messdatei. 6. Liefert auf Anfrage einen aktuellen Messwert des DAQ-Systems. 7. Liefert auf Anfrage techn. Informationen über das DAQ-System. 8. Überträgt auf Anfrage Kommando an DAQ-System. 9. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten.
Datenverteilungsagent	1. Erfragt Messdaten bei Sensorik-Agenten nach einem vorgegebenen Programm/Zeitplan. 2. Liest Messdaten ein. 3. Leitet die Messdaten zur Verarbeitung weiter. 4. Liefert auf Anfrage Informationen über das aktuelle Messprogramm. 5. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten.

4.3 Agentenorientierter Entwurf

In der Entwurfsphase wird das MAS durch zusätzliche Ergänzung der bereits identifizierten Agententypen und die Ermittlung von Interaktionen zwischen den Agententypen weiter konkretisiert.

4.3.1 Ergänzung der Agententypen

Zur Abbildung der Überwachungsbeteiligten wird ein zusätzlicher Agententyp, der *persönliche Agent*, vorgesehen. Hauptaufgabe des persönlichen Agenten ist es, eine Schnittstelle zwischen dem Multiagentensystem und den an der Überwachung beteiligten Fachexperten zu bilden. Die Interaktion mit dem Multiagentensystem wird dabei über eine grafische Benutzungsschnittstelle (engl. Graphical User Interface, GUI) realisiert, die vom persönlichen Agenten bereitgestellt wird. Das GUI wird als interaktive Schnittstelle ausgelegt, über die der Benutzer alle relevanten Informationen abrufen kann. Das GUI nimmt hierzu alle Eingaben des Benutzers entgegen, die in Nachrichten umgewandelt und an die Agenten des Bauwerksmonitoringsystems verschickt werden. Die eintreffenden Nachrichten anderer Agenten sowie

weitere Informationen und alle Funktionalitäten werden dem Benutzer ebenfalls über das GUI präsentiert.

Um das Bauwerksmonitoringsystem darüber hinaus mit einfachen Fähigkeiten zur Selbstüberwachung und Selbstheilung auszustatten, wird ein weiterer Agententyp, der *Systemüberwachungsagent*, zur Überwachung und Steuerung des Bauwerksmonitoringsystems vorgesehen. Dieser Agententyp wird in die Lage versetzt, den Zustand anderer Agenten zu überwachen, unvorhergesehene Ausfälle zu entdecken und ausgefallene („gestorbene“) Agenten an die Überwachungsbeteiligten zu melden. Zudem lassen sich ausgefallene Agenten über den Systemüberwachungsagenten wieder „starten“. Hierdurch wird die Robustheit und Ausfallsicherheit und damit die Zuverlässigkeit des Bauwerksmonitoringsystems verbessert.

Der Systemüberwachungsagent nutzt die von der FIPA-konformen Agentenplattform bereitgestellten Systemverwaltungsdienste und -mechanismen zur Realisierung von einfachen Selbstdiagnosefähigkeiten. Die Systemverwaltungsdienste werden durch das Agent Management System (AMS) bereitgestellt[2], das im Fall der verwendeten Agentenplattform JADE neben Aktionen zur Verwaltung der Plattform auch einen Benachrichtigungsdienst bietet, der über wichtige Plattformereignisse wie das Erzeugen und Beenden eines Agenten oder das Beenden von Containern informiert. Der Systemüberwachungsagent kann somit die Ereignisse der Agentenplattform in geeigneter Weise auffangen und die menschlichen Nutzer über die Ereignisse informieren.

Durch die Ergänzung der Agententypen umfasst das entwickelte Bauwerksmonitoringsystem insgesamt 10 Agententypen mit jeweils spezifischen Verantwortlichkeiten. Tabelle 4.3 gibt einen Überblick über die identifizierten Agententypen und ihre Verantwortlichkeiten; Details sind in Anhang C.2 vermerkt.

4.3.2 Bekanntschaften und Interaktionen

Die Problemlösungsfähigkeit der verwendeten Agententypen beruht ganz wesentlich auf der Interaktion zwischen den einzelnen Agententypen. Deshalb werden zunächst die Bekanntschaften zwischen den bereits identifizierten Agententypen ermittelt, die in einem „Bekanntschaftsdiagramm“ gesammelt und grafisch dargestellt werden: Agententypen werden dabei durch Kreise, die menschlichen Nutzer durch das UML-Akteur-Symbol, die Systemressourcen durch ein Rechteck und die Bekanntschaften durch offene Pfeile repräsentiert. Das entwickelte Bekanntschaftsdiagramm ist in Anhang C dargestellt.

Auf der Grundlage des Bekanntschaftsdiagramms lassen sich die Interaktionen für jeden Agententypen ermitteln und in Form einer Interaktionstabelle spezifizieren. Die Spezifikation umfasst die Verantwortlichkeit, das verwendete Interaktionsprotokoll, die Rolle des Agenten in der Kommunkationssituation (I = Initiator, R = Responder) und die auslösende Bedingung für die Interaktion. Die Interaktionstabelle ist dabei aus Systemsicht ein zentrales Artefakt, das die Interaktionen für das gesamte System beschreibt.

In Tabelle 4.4 wird exemplarisch nur die Interaktionstabelle für den Sensorikagenten entwickelt; die Interaktionstabellen für alle weiteren Agententypen befinden sich in Anhang C.4. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass der Sensorikagent für verschiedene Interaktionen auszulegen ist. Hierzu zählen z.B. die Beantwortung einer Anfrage nach einem aktuellen Messwert (Verantw. Nr. 6), nach gespeicherten Beobachtungen (Verantw. Nr. 3) oder nach Informationen über das gekapselte Datenerfassungssystem (Verantw. Nr. 7). Der Sensorikagent nimmt dabei überwiegend die Rolle des Initiators ein (siehe Spalte Rolle). Weiterhin kann der Tabelle

[2] vgl. Unterabschnitt 3.4.2

Tabelle 4.3: Überblick über die identifizierten Agententypen des Bauwerksmonitoringsystems

Agententyp	Verantwortlichkeit
Erfassung von Messdaten	
Sensorikagent	Kommuniziert mit Mess- und Datenerfassungssystemen. Ermöglicht einen Fernzugriff auf Datenerfassungssysteme.
Messdateiagent	Stellt den Inhalt einer Messdatei bereit.
Verteilung von Messdaten	
Datenverteilungsagent	Verteilt erfasste Messdaten an die verarbeitenden Agenten. Fragt die Sensorik- oder Messdateiagenten dazu periodisch ab.
Aufbereitung von Messdaten	
Datenverarbeitungsagent	Nimmt erfasste Messdaten entgegen, wandelt diese in ein Zielformat um und leitet die Messdaten zur Speicherung weiter.
Pflege von Messdaten	
Datenspeicherungsagent	Speichert Messdaten in einem Datenbanksystem und stellt Dienste zur Verwaltung der Daten bereit.
Nutzung von Messdaten	
Filteragent	Filtert erfasste Messdaten anhand von benutzerdefinierten Kriterien und führt Auswertungen durch.
Berichtsagent	Stellt erfasste Messdaten in Berichtsform dar. Lädt selbsttätig Messdaten aus einer Datenbank.
Statistikagent	Stellt statistische Funktionalitäten bereit. Kommuniziert hierzu mit einer Statistiksoftware.
Persönlicher Agent	Bildet die Schnittstelle zwischen MAS und den menschlichen Monitoringbeteiligten.
Selbstdiagnose	
Systemüberwachungsagent	Überwacht das System auf unvorhergesehene Ausfälle und informiert die menschlichen Monitoringbeteiligten.

entnommen werden, dass für die Interaktionen des Sensorikagenten die Interaktionsprotokolle FIPA-Request und Query-Ref zu verwenden sind.

Tabelle 4.4: Interaktionstabelle für den Sensorikagenten

Interaktion	**Verantw.**	**IP**	**Rolle**	**Mit**	**Wann**
Beantworte Frage nach aktuellem Messwert	6	FIPA Request	R	Datenverteilungsagent	Anfrage erhalten
Beantworte Anfrage, Beobachtungen zu holen	3	FIPA Request	R	Datenverteilungsagent	Anfrage erhalten
Beantworte Anfrage, Speicherort zu holen	5	FIPA Request	R	Datenverteilungsagent	Anfrage erhalten
Beantworte Anfrage, Geräteinfo zu holen	7	FIPA Request	R	Pers. Agent	Anfrage erhalten
Beantworte Anfrage, Kommandos zu übertragen	8	Query-Ref	R	Pers. Agent	Anfrage erhalten
Registriert sich beim DF-Agenten	9	FIPA Request	I	Gelbe Seiten-Agenten	Start des Agenten

Interaktionstabellen dienen dazu, viele für den Entwurf des internen Agentenverhaltens relevante Informationen zu entnehmen. Jede Verantwortlichkeit bzw. jede Interaktion wird in ein Behaviour[3] übertragen, durch das das jeweils in der Tabelle spezifizierte Interaktionsprotokoll und die Rolle des Agenten abgebildet werden. Zur Implementierung von Behaviours stellt die Agentenplattform JADE vorgefertigte Behaviours bereit, die zur Bearbeitung von Aufgaben mit oder ohne Beteiligung anderer Agenten genutzt werden können.

4.3.3 Dienste

Den innerhalb des Multiagentensystems zu veröffentlichenden Dienste werden sog. Dienstbeschreibungen (engl. service description) zugeordnet. Ein Dienst wird hierbei als eine Dienstleistung oder eine Aktion bzw. eine Folge von Aktionen aufgefasst, die der Agent ausführen und anderen Agenten anbieten kann. Im entwickelten Bauwerksmonitoringsystem werden folgende Dienste veröffentlicht:

sensors-service Dienst, der von den Sensorikagenten des Bauwerksmonitoringsystems bereitgestellt wird. Ermöglicht das Auffinden von Sensorikagenten sowie die objektbezogene und gerätebezogene Suche nach Messeinrichtungen (Sensoren). Sucheigenschaften sind das überwachte Objekt (Bauwerk) oder der Gerätetyp.

file-service Dienst zur Bereitstellung einer Messdatei. Wird vom Messdateiagenten veröffentlicht und enthält (Meta-)Informationen zur Messdatei.

daq-service Dienst, der von den Datenverteilungsagenten angeboten wird. Erlaubt es anderen Agenten, den bzw. die für ein spezifisches Bauwerk verantwortlichen Datenverteilungsagenten objektbezogen (bauwerksbezogen) aufzufinden.

[3]Entwurfsmuster gemäß der Subsumptionsarchitektur von Brooks [Brooks 86]. Ein auf Behaviours basierender Agent verwendet nur sehr wenige interne Variablen, um den Zustand der Umwelt zu modellieren. Stattdessen wird angenommen, dass alle Informationen als Eingabe des jeweiligen Behaviours vorliegen.

processing-service Dienst, der von den Datenverarbeitungsagenten angeboten wird; ermöglicht das Auffinden der auf die Verarbeitung von Messdatenformaten spezialisierten Agenten. Veröffentlicht/Gesucht wird der Typ des Datenerfassungssystems.

storage-service Dienst, der von Datenspeicherungsagenten veröffentlicht wird; ermöglicht es, eine Datenbank anhand des Bauwerks und/oder des Auswertungszeitraumes zu finden.

statistics-service Von den Statistikagenten des Bauwerksmonitoringsystems bereitgestellter Dienst zur Nutzung von integrierter Software; erlaubt es, nach spezifischer Software zu suchen.

observation-service Dienst, der von den Systemüberwachungsagenten angeboten wird. Systemüberwachungsagenten des Monitoringsystems können über diesen Dienst einfach aufgefunden werden.

Ein Beispiel für ein Dienstdiagramm ist die vom Sensorikagenten veröffentlichte Dienstbeschreibung in Abb. 4.5. Bereitgestellte Dienste werden in Form eines erweiterten UML-Klassendiagramms dargestellt, wobei Agenten durch Kreise und Dienste durch das UML-Klassensymbol symbolisiert werden. Vom Sensorikagenten wird der Dienst sensors-service veröffentlicht; dieser enthält eine Eigenschaft zur Beschreibung eines Merkmals/Bauwerks (engl. feature) und eines Gerätes, sodass sowohl eine bauwerks- als auch eine gerätebezogene Suche nach Messeinrichtungen ermöglicht wird.

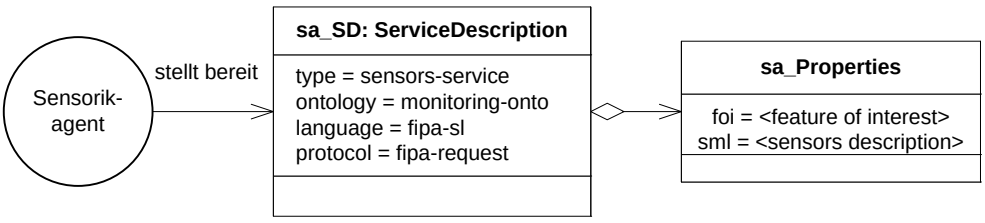


Abbildung 4.5: Dienste des Sensorikagenten

4.4 Individuelle Problemlösungskompetenzen der Agententypen

Die Multiagentensystemtechnologie stellt einen informatischen Ansatz zur Zerlegung eines komplexen Problems in Teilprobleme und zur Zuweisung der Teilprobleme an geeignete Problemlösungseinheiten, die Agententypen, dar. Um die Agententypen des Bauwerksmonitoringsystems mit entsprechenden Problemlösungsfähigkeiten auszustatten, werden in den folgenden Unterabschnitten die individuellen Problemlösungskompetenzen der einzelnen Agententypen erarbeitet. Kompetenzen sind vor allem zur Lösung der folgenden Teilprobleme vorzusehen (vgl. Unterabschn. 4.1.3):

1. Intelligente Steuerung des Datenerfassungsvorgangs (Schritt 1: Erfassung von Messdaten)
2. Filterung von veralteten Messdaten (Schritt 3: Aufbereitung von Messdaten)
3. Rechnerbasierte Prognose des Bauwerksverhaltens (Schritt 5: Nutzung von Messdaten)
4. Automatisierte Bewertung der Messdaten (Schritt 5: Nutzung von Messdaten)

5. Systemüberwachung und -diagnose

In den folgenden Unterabschnitten werden die Konzepte zur Bereitstellung der geforderten Kompetenzen entwickelt.

4.4.1 Intelligente Steuerung des Datenerfassungsvorgangs

Bei Einsatz intelligenter Sensoren oder entsprechend leistungsfähiger Datenerfassungsgeräte ist schon im ersten Schritt des Monitoringablaufs, der Erfassung von Messdaten, eine intelligente Steuerung des Datenerfassungsvorganges möglich. Die intelligente Steuerung des Datenerfassungsvorgangs wird insbesondere zur periodisch-ereignisgesteuerten Erfassung dynamischer Messgrößen benötigt: die aktuellen Messgrößen werden zwar regelmäßig gemessen, die Speicherung der Messgrößen wird jedoch erst durch ein zuvor spezifiziertes Ereignis ausgelöst. Tritt das Ereignis nicht ein, wird der aktuell gemessene Wert als „unwichtig“ betrachtet, wieder verworfen und nicht gespeichert.

Die Entscheidung, wann ein Messwert „wichtig“ bzw. „unwichtig“ ist, kann als die regelbasierte Auswertung eines aufgetretenen Ereignisses aufgefasst werden. Das Ereignis selbst wird durch das Signal eines Sensors (z.B. eines Annäherungssensors), das Über- oder Unterschreiten eines Schwellenwertes (z.B. eines Beschleunigungs- oder Verformungssensors) oder die Kombination beider ausgelöst. Durch die gezielte Nutzung geeigneter Sensorarten und die Festlegung von Schwellenwerten für Sensoren lassen sich somit verschiedenartige Ereignisse, wie z.B. die Überfahrt eines Fahrzeuges, detektieren. Nachdem das Ereignis detektiert wurde, wird dann die Erfassung weiterer Messwerte ausgelöst.

Da auf der Grundlage des entwickelten agentenbasierten Konzepts eine direkte Kommunikation zwischen Sensorikagent und Sensor bzw. Datenerfassungsgerät leicht möglich ist, wird der Sensorikagent mit einem Verhaltensbaustein erweitert, der ein periodisches Sampling des Sensors durchführt und in Abhängigkeit vom aktuellen Sensorwert regelbasiert eine oder mehrere Aktionen ausführt. Das Konzept wird in Abb. 4.6 veranschaulicht.

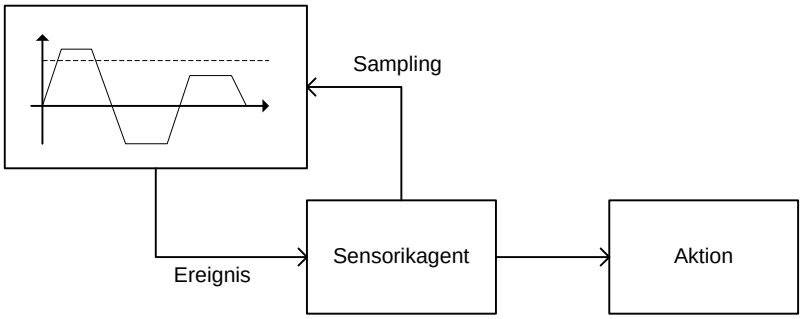


Abbildung 4.6: Konzept zur agentenbasierten Steuerung des Datenerfassungsvorganges

4.4.2 Filterung von Messdaten

Die verteilte Messdatenerfassung ist in der Praxis häufig fehlerbehaftet, da die Messdaten aus mehreren Datenerfassungsgeräten oder -systemen zusammengeführt und gemeinsam aufbereitet werden müssen. Insbesondere durch den Übertragungsvorgang aus den Gerätespeichern

und die Zwischenspeicherung in Dateiform werden bereits erfasste (veraltete) Messdaten oftmals redundant gespeichert und aktuelle (nützliche) Messwerte überschrieben. Die Folge ist ein inkonsistenter Datenbestand mit fehlerhaften Messwerten und lückenhaften Messchrieben.

Um die Verarbeitung von Messdaten zu verbessern, wird der Datenverteilungsagent deshalb mit geeigneter Fachlogik ausgestattet, die veraltete Messdaten schon während der Verteilung automatisiert erkennt. Der Datenverteilungsagent liest hierzu in regelmäßigen Abständen die erfassten Messwerte aus den generierten Messdateien oder den Gerätespeichern aus und vergleicht die neuen Messwerte mit den bereits erfassten Messwerten.

Zur Filterung der Messdaten wird ein zweischrittiges Konzept umgesetzt: Da im Arbeitsschritt „Verteilung“ die erfassten Messgrößen nur in Dateiform vorliegen, wird zunächst ein textueller (synoptischer) Vergleich der Messdateien durchgeführt, um Veränderungen an der Messdatei und darauf aufbauend die neuen Messgrößen zu ermitteln. Der textuelle Vergleich wird gewählt, weil dieser allgemein anwendbar ist, ohne zusätzliche Konfiguration auskommt und sich somit sehr gut für den Dateivergleich in einem dynamischen Umfeld eignet. Im zweiten Schritt werden dann die in der Messdatei als neu erkannten Zeilen weitergeleitet, in Messwertobjekte transformiert und schließlich mit den bereits erfassten Messgrößen verglichen.

4.4.3 Rechnerbasierte Prognose des Bauwerksverhaltens

Zur automatisierten Bewertung der Messdaten ist es essentiell wichtig, Messwerte mittels quantitativer Modelle berechnen zu können, um Vergleichswerte für die gemessenen Werte zu erhalten. Prototypisch wird deshalb für das Bauwerksmonitoringsystem ein Prognosemodell erstellt, das zur automatisierten Bewertung der Messdaten in der Fachdomäne Talsperrenüberwachung verwendet werden kann. Zu diesem Zweck wurden mehrere Analyse- und Prognosemodelle aus der Talsperrenüberwachung evaluiert; als ein für die Prognose des Bauwerksverhaltens geeigneter Ansatz wurde die HST-Methode[4] eruiert (vgl. [Mittrup 05]). Die HST-Methode erlaubt es, die Zielgröße Verformung auf der Basis der Einflussgrößen Stauhöhe, Temperatur und zeitabhängige plastische Verformung zu berechnen.

Die Anwendung der HST-Methode auf die Messdaten des Referenzbauwerks Ennepetalsperre ist in Abb. 4.7 dargestellt. Die Koeffizienten des Funktionsansatzes wurden auf der Basis realer Messdaten ermittelt.

Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Verformungen zeigt, dass das Bauwerksverhalten sehr gut simuliert wird. Dies belegt die grundsätzliche Eignung der HST-Methode zur Prognose des Bauwerksverhaltens. Als positive Eigenschaft ist besonders hervorzuheben, dass die HST-Methode die Simulation des Bauwerksverhaltens ohne ein strukturmechanisches Modell erlaubt und deshalb mit geringem Aufwand in einen Agententypen integrierbar ist. Alternativ ist auch der Einsatz einer deterministischen Simulation möglich; hierzu müsste eine Finite-Element-Simulation mit dem Agentensystem verbunden werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Integration einer derartigen Simulation in das Agentensystem in der Diplomarbeit [Marx 06] untersucht. Die technische Realisierbarkeit wurde dabei erfolgreich nachgewiesen und ein Simulationsmodell für die Ennepetalsperre entwickelt. Aus Performanzgründen und der schlechteren Übertragbarkeit der strukturmechanischen Modelle wird aber auf die Integration einer Finite-Element-Simulation verzichtet.

[4] Die für die Talsperrenüberwachung relevanten Prognose- und Analysemodelle wurden in Abschn. ?? erläutert.

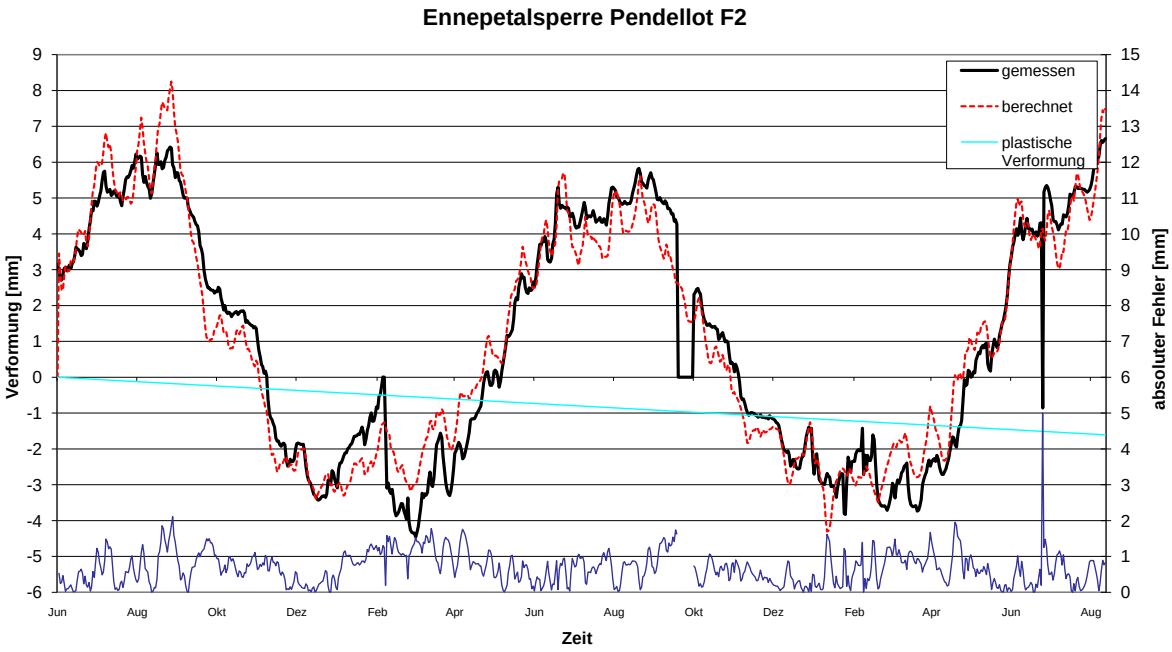


Abbildung 4.7: Prototypisches, auf der HST-Methode basierendes Prognosemodell für die radiale Verformung der Ennepestaumauer

4.4.4 Automatisierte Bewertung von Messdaten

Zur Entscheidungsunterstützung der Monitoringbeteiligten soll ein Konzept für die automatisierte Bewertung der Messdaten entwickelt werden. Der für die automatisierte Bewertung der Messdaten verantwortliche Agententyp, der Filteragent, soll mit Fachlogik ausgestattet werden, um anhand der Messdaten den Bauwerkszustand zu folgern und den Monitoringbeteiligten eine Entscheidungsunterstützung zu geben.

Eine zur automatisierten Auswertung von Messdaten aus der Bauwerksüberwachung durchgeführte Literaturrecherche ergab, dass mit [Salvaneschi 95] ein wissensbasierter Ansatz zur Auswertung von Messdaten existiert, der bereits erfolgreich auf die Talsperrenüberwachung [Masera 95] angewendet wurde. Der Ansatz wird agentenorientiert aufbereitet und im Bauwerksmonitoringsystem zur Diagnose des Bauwerkszustandes, insbesondere der Standsicherheit, genutzt. Das Konzept wird im Folgenden beschrieben.

Das Konzept der „diagnostischen Datenauswertung“ beruht auf der Definition mehrfacher (i) Zustandsräume und (ii) Auswertungspfade. Die *Zustandsräume* (engl.: state spaces) bilden die möglichen (und nicht möglichen) Zustände des betrachteten physikalischen Systems ab. Innerhalb der möglichen Zustände wird zwischen erstrebenswerten und nicht erstrebenswerten Zuständen unterschieden, wobei sich der Zustand des physikalischen Systems möglichst nah an den erstrebenswerten Zuständen und möglichst weit von den nicht erstrebenswerten Zuständen befinden soll. Auf der Basis des Konzeptes wird das physikalische System durch verschiedene Zustandsräume beschrieben. Ein erster Zustandsraum kann z.B. durch ein einfaches Modell definiert werden, in dem mögliche Zustände durch die Werte einer Menge von Variablen definiert werden. Der aktuelle Systemzustand wird durch die aktuellen Werte der Variablen beschrieben; erstrebenswerte und nicht erstrebenswerte Zustände werden mithilfe von Schwellenwerten definiert, die auf alten Beobachtungen basieren. Ein zweiter Zustandsraum kann z.B. durch ein statistisches Modell erzeugt werden, das auf alten Beobachtungen

basiert, während ein dritter Zustandsraum ein Kausalnetz der möglichen physikalischen Prozesse des Bauwerks (z.B. Kippen oder Gleiten des Bauwerks) nutzen kann.

Mittels der *Auswertungspfade* (engl.: reasoning paths, RP) wird ausgehend von den am System gemessenen Daten in mehreren Schritten die aktuelle Lage des Systems bzw. des Systemzustandes in den verschiedenen Zustandsräumen ermittelt. Abhängig vom Abstand des aktuellen Systemzustands zu den erstrebenswerten bzw. nicht erstrebenswerten Systemzuständen wird dann der Bauwerkszustand gefolgert und evtl. das weitere Verhalten des Bauwerks prognostiziert. Es werden insgesamt vier Auswertungspfade zur Schlussfolgerung aus den Messdaten definiert, die im Folgenden erläutert werden.

Auswertungspfad 1: Schwellenwertbasierte Bewertung von Einzelmesswerten

Der Zustandsraum wird durch Zielgrößen, wie z.B. die Verformungen einer Staumauer unter der durch das Monitoringsystem erfassten Lasteinwirkung, festgelegt. Die Messwerte werden einzeln ausgewertet, wobei die erstrebenswerten und nicht erstrebenswerten Zustände anhand von Schwellenwerten definiert werden. Jede Variable besitzt einen Satz von Schwellenwerten, die aus alten Messungen abgeleitet werden. Die Schwellenwerte unterteilen die möglichen Räume in Subräume. Hierzu werden die Kategorien normal, low anomaly, medium anomaly, high anomaly, very high anomaly verwendet. Zur Schlussfolgerung wird jeder Messwert gefiltert, das Ergebnis mit den Schwellenwerten verglichen und die Lage des aktuellen Zustandes in den Subräumen ermittelt:

Daten	→	(Filterung)	→	Aktueller Zustand	→	(Vergleich mit Schwellenw.)	→	Gewünschter/ Ungewünschter Zustand

Auswertungspfad 2: Bewertung von Messwerten über Ursache-Wirkungs-Beziehungen

Für Auswertungspfad 2 werden Gruppen von Einflussgrößen (Einwirkungen) und die zugehörigen Zielgrößen betrachtet. Für jede Menge von Einflussgrößen und eine Zielgröße werden die erstrebenswerten und nicht erstrebenswerten Zustände durch quantitative Modelle und Grenzwerte festgelegt. Die Modelle können aus zurückliegenden Beobachtungen oder dem aktuellen Verhalten des Bauwerks abgeleitet werden. Ein Modell beschreibt z.B. den Zusammenhang zwischen der Stauhöhe, der Lufttemperatur und der Verformung der Staumauer.

Für jede Gruppe werden die Messwerte gefiltert und die Reaktion des Bauwerks (Zielgröße) auf die der gemessenen Einwirkungen (Einflussgrößen) über das Modell berechnet. Danach wird die berechnete Zielgröße mit der berechneten verglichen. Folgende drei Bewertungsfälle können auftreten:

- Die gemessenen Werte liegen außerhalb der festgelegten Grenzwerte. Der Zustand des Bauwerks wird als anormal gekennzeichnet.
- Die berechneten Zustände und der gemessene Zustand stimmen überein und die Werte befinden sich innerhalb der Grenzwerte. Der Zustand des Bauwerks wird als normal gekennzeichnet.
- Die berechneten Zustände und der gemessene Zustand stimmen nicht überein, die gemessenen Werte befinden sich aber innerhalb der Grenzwerte. In diesem Fall sind die Modelle und die Messwerte inkonsistent. Diese Situation wird als gefährlich eingestuft,

da in dem Bauwerk Prozesse ablaufen die nicht zu erklären sind. Der Zustand des Bauwerks wird als anormal gekennzeichnet.

Der Ablauf ist im folgenden Graph dargestellt:

Daten	→	(Filterung & Gruppierung)	→	Aktueller Zustand	→	(Berechnung von Reaktionen & Vergleich durch Modelle & Schwellenw.)	→	Gewünschter/ Ungewünschter Zustand

Auswertungspfad 3: Phänomenologische Betrachtung von Messwertgeberfamilien (Phänomene)

Der Zustandsraum wird identifiziert durch Mengen von Zielgrößen, die zu einer spezifischen Sensorart gehören, z.B. die Menge von Extensometern in einer Staumauer. Mehrere Sensoren/Messwertaufnehmer ein und desselben Typs (z.B. Extensometer) werden hierzu als eine Gruppe zusammengefasst. Jede Gruppe identifiziert das globale Verhalten des physikalischen Systems, das als Phänomen bezeichnet wird. Zwar kann auf diese Weise kein bestimmter physikalischer Prozess, wie z.B. ein stark anormales Kippen eines einzelnen Mauerblocks, identifiziert werden, jedoch kann eine allgemeinere und unklare Situation (z.B. stark anormale Bewegungen des Bauwerks) erkannt werden.

Der Zustand des Bauwerks wird mittels empirischer Regeln bewertet, welche die Signifikanz und Zuverlässigkeit der verwendeten Messwertaufnehmer berücksichtigen. Die Auswertung dieser Regeln liefert mögliche Hinweise auf den aktuellen Zustand des Bauwerks:

Daten	→	(Filterung & Gruppierung)	→	Aktueller Zustand	→	(Verknüpfung durch empirische Regeln)	→	Gewünschter/ Ungewünschter Zustand

Auswertungspfad 4: Prüfung auf kritische physikalische Prozesse

Der Zustandsraum wird in diesem Fall durch eine Menge von möglichen physikalischen Prozessen identifiziert, die im Bauwerk aktiv sein können (z.B. Kippen, Gleiten, Sickerwasseranstieg). Jedem möglichen Prozess wird ein Zustand, von wünschenswert (normal) bis hochgradig unerwünscht (very high anormal), zugeordnet. Ein Prozess wird definiert über ein qualitatives Modell, das die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Zielgrößen abbildet. Die Modelle bilden die geometrischen oder physikalischen Einschränkungen/Bedingungen zwischen Messwerten ab. Die Werte der Variablen werden hierzu von den tatsächlichen Werte abstrahiert und in qualitative Beschreibungen übertragen. Das Kippen eines Bauwerksabschnittes kann z.B. mit den Kategorien non active, low, medium, high und very high klassifiziert werden. Wird über das Gewichtslot die starke Verschiebung eines Staubauwerkes in Richtung der Luftseite angezeigt und melden Druckmessgeber die einseitige Erhöhung des Drucks im Fundament zur selben Seite, kann dadurch ein Rotationsprozess bzw. eine Kippbewegung des Bauwerks geschlussfolgert werden.

Daten	→	(Qualitative Abstraktion)	→	Qualitative Daten	→	(Verifikation der Bedingungen d. Regeln)	→	Gewünschter/ Ungewünschter Zustand

Die oben beschriebenen Auswertungspfade werden einem Agententypen, dem Filteragenten, übergeben, der die Auswertungspfade periodisch berechnet und die erfassten Messwerte bewertet. Für das Referenzsystem Ennepetalsperre werden drei Auswertungspfade zur schwellenwertbasierten Bewertung von Einzelmesswerten, zur phänomenologischen Betrachtung von Messwertgeberfamilien und zur Prüfung auf kritische physikalische Prozesse prototypisch umgesetzt. Die erforderlichen statischen Schwellenwerte für die einzelnen Messstellen werden hierzu konkret ermittelt und die Messwertgeber in Familien zusammengefasst. Die in Abstimmung mit dem Ruhrverband für Schwergewichtsstaumauern entwickelten Pfade können Tabelle 4.5 entnommen werden.

Tabelle 4.5: Implementierte Auswertungspfade für das Referenzsystem Ennepetalsperre

Einzelmesswert	Schwellenwert
F1PX, F1PY, F2PX, F2PY, S1, S2, S3, D2L1, ...	basierend auf alten Messungen

Messwertgeberfamilie (Phänomen)	Sensor
Sickerwasser Hang	S1, S2
Sickerwasser Summe	S3
Gewichtslot	F1PX, F2PX
Schwimmlot	F1SX, F2SX
Porenwasserdruck wasserseitig	E1-1, E1-2
Porenwasserdruck Gründungsfuge	E1-5-1, E1-5-2
Porenwasserdruck Mauer	E1-6-1, E1-6-2

Prozess	Gewichtslot	Schwimmlot	Sickerwasser		Porenwasserdruck		
			Hang	Summe	wassserseitig	Gründungsfuge	in der Mauer
Kippen der Mauer in einer Mauerwerksfuge	ws/ls		-/+	-/+			-/+
Kippen der Mauer in der Sohlfuge	ws/ls		-/+	-/+		-/+	
Bruchversagen im Fels	?	ws/ls					
Gleiten der Mauer		ls	?	?	?	?	
Öffnen von Klüften im Untergrund			+	+	?	?	
Erosion im Untergrund			+	+		+	
Erosion in der Mauer			+	+			+
Auftriebsversagen in der Mauer							+
Auftriebsversagen in der Sohlfuge						+	
Zusintern der Drainagen			-	-			+

ws = wasserseitig, ls = luftseitig, ? = unklar

4.4.5 Systemüberwachung und -diagnose

Wie in Unterabschn. 4.3.1 bereits erwähnt, wird das Bauwerksmonitoringsystem mit einfachen Fähigkeiten zur Selbstüberwachung und Selbstdiagnose ausgestattet. Hierzu wird ein spezieller Agententyp vorgesehen, der in der Lage ist, die von der Agentenplattform bereitgestellten Systemverwaltungsdienste zu nutzen. Die Systemverwaltungsdienste werden durch das Agent Management System (AMS) bereitgestellt[5] und bieten unter anderem die Möglichkeit, den Lebenszustand eines Agenten zu erfragen oder sich bei bestimmten Ereignissen informieren zu lassen. Die möglichen Zustände eines Agenten und die entsprechenden Übergänge sind in Abb. 4.8 dargestellt.

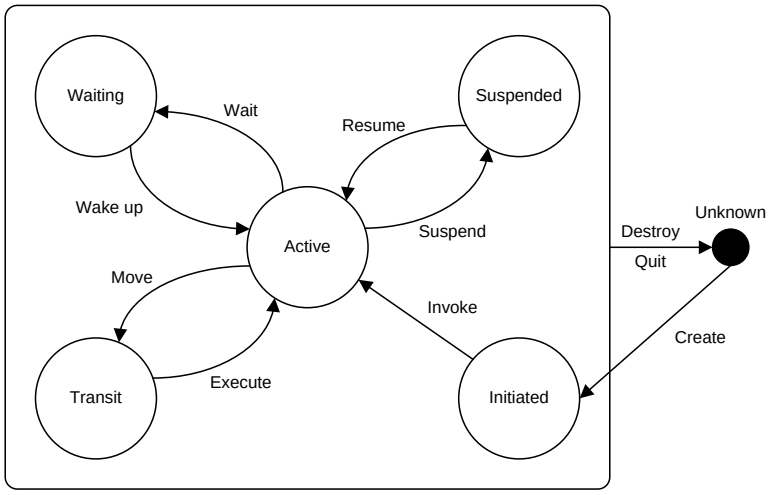


Abbildung 4.8: Lebenszyklus eines Agenten

Wechselt ein Agent seinen Zustand, wird auf der Agentenplattform ein spezielles Ereignis „gefeuert“. In Abhängigkeit von der verwendeten Agentenplattform stehen neben Informationen über die Agentenzustände auch Information über Plattformereignisse, wie das Erzeugen und Beenden eines Agenten oder das Beenden von Containern, zur Verfügung. Somit sind vielfältige Informationen zur Selbstüberwachung und -diagnose des Agentensystems verfügbar, die vom Systemüberwachungsagenten genutzt werden sollen.

Im Fall der verwendeten Agentenplattform JADE kann zur Interaktion mit dem AMS die `JADE-Introspection`-Ontologie verwendet werden. Das AMS ist in JADE streng agentenorientiert als eigener Agententyp ausgeführt, der für alle Agententypen des Multiagentensystems erreichbar ist. Die Interaktion mit dem AMS erfolgt ausschließlich auf der Basis der `JADE-Introspection`-Ontologie, wobei mittels spezifischer Konzepte und Aktionen Informationen über Ereignisse, wie z.B. das Starten eines neuen Agenten (`born-agent`) oder das Beenden/Ausfallen eines Agenten (`dead-agent`), ausgetauscht oder Aktionen ausgeführt werden können.

[5] vgl. Unterabschnitt 3.4.2

4.5 Ressourcen

Die Interaktion mit den Ressourcen des MAS ist von besonderer Bedeutung für den Entwurf des Multiagentensystems. Aufbauend auf der in Abschnitt 4.2 durchgeführten Analyse werden die folgenden Ressourcen identifiziert:

- Messeinrichtungen (Sensoren, Mess- und Datenerfassungssysteme),
- Messdateien,
- Datenbanken und
- Statistiksoftware.

Die Ressourcen werden jeweils durch einen dafür ausgelegten Agententypen verfügbar gemacht. Zur agentengerechten Interaktion mit den Ressourcen wird das Konzept des Transducing aus [Genesereth 94] angewendet, das nachfolgend erläutert wird. Die Agenten werden dazu auf dem lokalen Rechner platziert, um von dort aus einen Zugriff auf die jeweilige Ressource herzustellen. Im Folgenden werden die Einzelkonzepte zur Interaktion mit den Ressourcenarten grob skizziert.

4.5.1 Messeinrichtungen

Die systematische und automatisierte Erfassung von Messgrößen ist nur bei Einbindung der in situ installierten Messeinrichtungen möglich. Die Messeinrichtungen sind aus diesem Grund als essentielle Ressourcen in das Bauwerksmonitoringsystem einzubinden. Konkret geht es darum, eine Kommunikation mit Messeinrichtungen über die vorhandenen Hardware-Kommunikationsschnittstellen der Datenerfassungssysteme zu ermöglichen.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Kommunikation mit den im Bauwerksmonitoring verwendeten Messeinrichtungen — im Gegensatz zu standardisierten Softwareschnittstellen — ein hardware-abhängiger Vorgang ist. Die Kommunikation muss über die Datenerfassungssysteme erfolgen, da nur diese Geräte die erforderlichen Kommunikationsschnittstellen besitzen und innerhalb des lokalen Datenerfassungsnetzwerks[6] adressierbar sind. Da für die Dauerüberwachung von Bauwerken in der Praxis vorwiegend Datenlogger als autonome Datenerfassungsgeräte eingesetzt werden, wird das Integrationskonzept speziell auf Datenlogger ausgerichtet.

Die Integration in das Multiagentensystem soll durch das Konzept des *Transducing* erfolgen: die an einen Datenlogger zu übertragenden Daten werden dabei innerhalb des Bauwerksmonitoringsystems von anderen Agenten als Inhalt einer ACL-Nachricht an einen verantwortlichen Agenten, den Sensorikagenten, verschickt, der zwischen Multiagentensystem und Datenlogger „übersetzt“, indem dieser die Daten (z.B. Steuerbefehle) zunächst aus der ACL-Nachricht extrahiert und dann über die Hardwareschnittstellen des Messrechners an den Datenlogger sendet. Eine Ausgabe des Datenloggers wird in umgekehrter Reihenfolge an den anfragenden Agententypen verschickt. Das Konzept wird in Abbildung 4.9 veranschaulicht.

Um einerseits eine sehr hardwarenahe Kommunikation zu realisieren und andererseits eine Abstraktion von proprietären gerätespezifischen Befehlssätzen zu erreichen, werden zwei Kommunikationswege konzipiert (Szenario a. und b. in Abb. 4.9). Im Fall a. wird der Inhalt einer Nachricht in der Logger-Befehlssprache kodiert (`:language ldt`). Der Sensorikagent überträgt die empfangene Anfrage bzw. den Steuerbefehl (`:content logger_command`)

[6] vgl. Abschn. 2.3

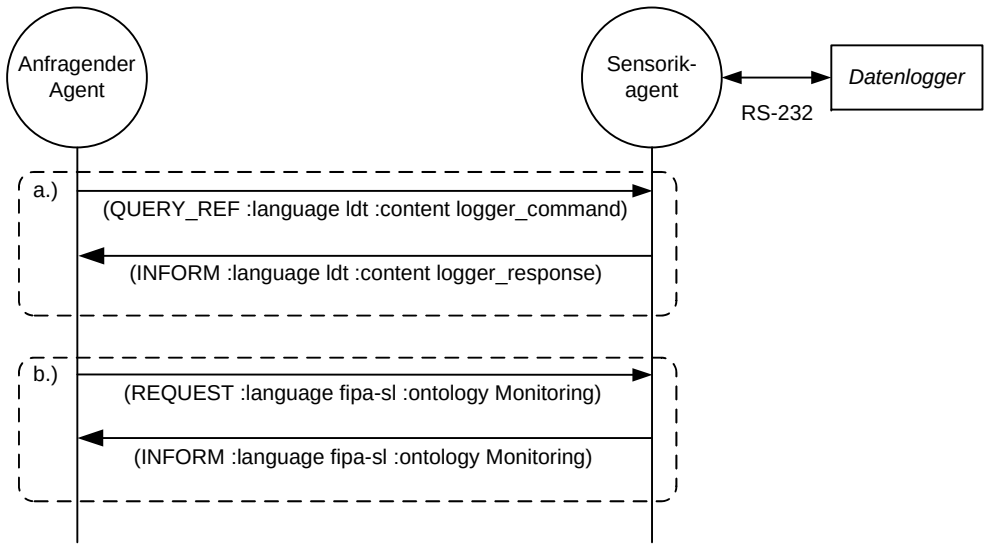


Abbildung 4.9: Konzept zur Kommunikation mit Messeinrichtungen

über die serielle Schnittstelle an den Datenlogger. Die Anwort des Datenloggers wird als Inhalt einer Nachricht (`:content logger_response`) verschickt, die ebenfalls in der Logger-Befehlssprache kodiert ist.

Im Fall b.) basiert die Kommunikation mit dem Datenlogger auf einer eigens für die Domäne Bauwerksmonitoring entwickelten Ontologie, die spezifische Agentenaktionen, Prädikate und Konzepte zur Interaktion mit Messeinrichtungen enthält (`:ontology Monitoring`). Die Nachricht wird dazu in der Inhaltssprache FIPA SL (`:language fipa-sl`) kodiert. Im Inhaltsfeld der Nachricht wird die auszuführende Aktion übermittelt, wobei durch die Verwendung einer semantischen Inhaltssprache eine Prüfung des Inhalts und eine Interpretation durch die Agenten möglich ist.

4.5.2 Messdateien

Wenn keine direkte Kommunikation mit den Datenerfassungsgeräten, z.B. aus technischen oder Sicherheitsgründen, möglich ist, muss stattdessen eine lose Kopplung mit den bestehenden Mess- und Datenerfassungssystemen auf der Basis von Messdateien vorgesehen werden. Voraussetzung ist, dass bereits ein entsprechendes System oder eine Software vorhanden ist, um selbsttätig Dateien aus den erfassten Messdaten zu generieren.

Auf die von einem Fremdsystem generierte Messdatei wird durch den Agententyp Messdatei (Messdateiagent) zugegriffen, der die Messdatei periodisch auf neue Messdaten bzw. Änderungen untersucht und anderen Agenten jeweils aktuelle Messdaten bereitstellt. Der Messdateiagent wird als Wrapper-Agent ausgelegt und veröffentlicht geeignete Dienste, die einen Zugriff auf entfernte Messdateien ermöglichen. Da auf der Messdatei i.d.R. nur Leseaktionen ausgeführt werden, die sich sehr gut durch Agentenaktionen abstrahieren lassen, wird beim Zugriff auf Messdateien eine ontologiebasierte Kommunikation implementiert (s. Abb. 4.10). Die angeforderte Aktion muss dabei im Inhaltsfeld einer Nachricht verschickt werden. Die Semantik und das zu verwendende Vokabular werden auch hier — wie im Fall des zuvor beschriebenen Sensorikagenten — durch eine spezifische Bauwerksmonitoring-Ontologie festgelegt. Die Kodierung der Nachrichten erfolgt analog zum Sensorikagenten in der Inhaltssprache FIPA SL.

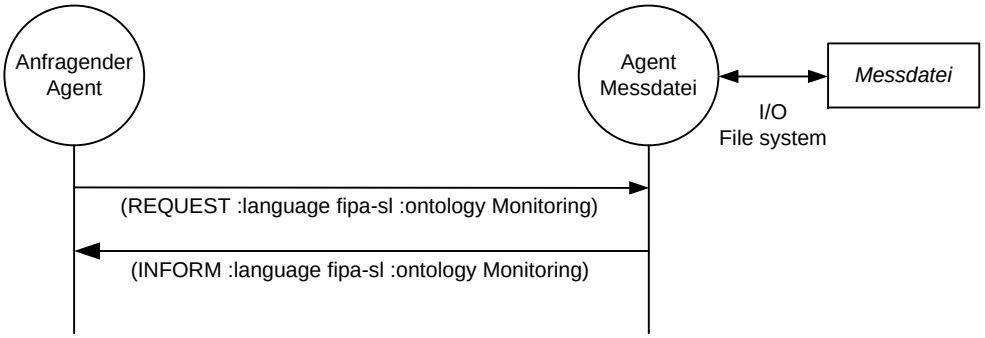


Abbildung 4.10: Konzept für den Zugriff auf Messdateien

4.5.3 Messdatenbanken

Die Speicherung von erfassten Messdaten erstreckt sich im Bauwerksmonitoring über relativ lange Zeiträume. Da die Messdaten im Idealfall mit Baubeginn des Bauwerks erfasst werden und während der gesamten Lebensdauer des Bauwerks zur Verfügung stehen sollen, ist das zu entwickelnde Bauwerksmonitoringsystem für die Archivierung von Messdaten über mehrere Jahrzehnte auszulegen.

Es wird deshalb größter Wert auf den Einsatz leistungsfähiger Datenbanksysteme gelegt. Die in den Datenbanken gespeicherten Messdaten werden folglich von einem spezialisierten Agententypen, dem Datenspeicherungsagenten, verwaltet. Die Interaktionen anderer Agententypen mit einer Datenbank, etwa zur Speicherung von Messdaten, werden ausschließlich über diesen Agententypen realisiert. Der Datenspeicherungsagent führt die Aktion aus und greift hierzu auf das Datenbanksystem zu. Auch die Interaktion der Systemnutzer mit den Datenbanken muss über den Datenspeicherungsagenten und die persönlichen Agenten realisiert werden, sodass ein konsistenter Zustand der Datenbank sichergestellt ist.

Um die Details des Datenbankzugriffs vor den anderen Agententypen zu „verbergen“ und einen Mehrwert gegenüber einem direkten Datenbankzugriff zu erzielen, wird der Datenspeicherungsagent so ausgelegt, dass auf oberster Ebene geeignete Aktionen zur Interaktion mit der Datenbank bereitgestellt werden. Geeignete Dienste sind z.B. das Einfügen, Ändern oder Löschen von Messwerten und die Suche nach Messwerten — basierend auf Kriterien wie Zeitpunkt oder Ort der Messung. Diese Aktionen werden ebenfalls in die Bauwerksmonitoring-Ontologie aufgenommen.

Bei der Interaktion mit Datenbanken auf technischer Ebene ist zu berücksichtigen, dass das in dieser Arbeit intern verwendete objektorientierte Datenmodell auf die Struktur der jeweiligen Datenbank abgebildet werden muss. Im Fall einer relationalen Datenbank müssen die Objekte z.B. in Form von Tabellen in der Datenbank implementiert werden. Aus diesem Grund wird für den Zugriff auf die relationalen Datenbanksysteme des Bauwerksmonitoringsystems das objekt/relationales Mapping-Framework Hibernate [Red Hat Middleware, LLC 09] eingesetzt.

4.5.4 Statistiksoftware

Zur Interaktion mit statistischer Auswertungssoftware wird ein spezialisierter Agententyp, der Statistikagent, vorgesehen. Der Agententyp macht primär eine zur Messdatenauswertung verwendete Statistiksoftware innerhalb des Bauwerksmonitoringsystems verfügbar, wobei die

zur Nutzung der Software vom Benutzer eingegebenen Anweisungen zunächst vom persönlichen Agenten entgegengenommen werden. Der persönliche Agent leitet dann die Befehle an den Statistikagenten weiter, der die Anweisung in der Statistiksoftware ausführt und das Ergebnis übermittelt.

Auf Agentenebene wird die Statistiksoftware durch das bereits bei der Interaktion mit Messeinrichtungen angewendete Konzept des Transducing bereitgestellt. Die in der Software auszuführenden Anweisungen werden hierzu als Nachrichteninhalt zwischen den Agenten übertragen, wobei das Inhaltsfeld der ACL-Nachricht in der Sprache der Statistiksoftware kodiert ist. Der Statistikagent selbst wird auf dem Rechner platziert, auf dem sich die Statistiksoftware befindet, und kommuniziert rein lokal mit der externen Software.

Um das entwickelte Bauwerksmonitoringsystem von kommerzieller Software unabhängig zu machen, wird auf freie Software zurückgegriffen. Auf die eigene Programmierung von speziellen statistischen Verfahren wird verzichtet, da die zur Messdatenauswertung angewendeten Verfahren bereits als fertige Implementierungen zur Verfügung stehen. Eine zu frei verfügbarer statistischer Software durchgeführte Literaturrecherche ergab, dass mit der Software R [R Development Core Team 09] eine entsprechende Open-Source-Software erhältlich ist, die zur Messdatenauswertung im Bauwerksmonitoringsystem geeignet ist.

Da R sowohl eine Software als auch eine Programmiersprache ist und durch eine Vielzahl verfügbarer Pakete sehr gut erweiterbar ist, eignet sie sich hervorragend für eine Integration in das Bauwerksmonitoringsystem. Der Statistikagent wird deshalb vorrangig für die Interaktion mit der Software R ausgelegt. Die genauen Verantwortlichkeiten des Statistikagenten werden dabei in der Verantwortlichkeitentabelle zusammengefasst, die in Anhang C zu finden ist und die Grundlage für die Implementierung des Agententypen bildet.

4.6 Informationsmodellierung

4.6.1 Datenmodellierung für die Domäne Bauwerksmonitoring

Da das Bauwerksmonitoring durch die Erfassung und Auswertung von verteilt anfallenden Messdaten geprägt ist, ist ein passendes Datenmodell erforderlich. Dieses Datenmodell bildet die Basis der Bauwerksmonitoring-Ontologie, die ihrerseits das Datenmodell mit Prädikaten und Agentenaktionen erweitert, um einen Austausch von Informationen über Beobachtungen und Beobachtungs-, Mess- und Auswertungsprozesse zwischen den Agenten des Bauwerksmonitoringsystems zu ermöglichen.

Das Datenmodell hat zunächst die relevanten Eigenschaften von Beobachtungen und Messungen abzubilden. In Anlehnung an [Fowler 97] wird dabei zwischen quantitativen und qualitativen Beobachtungen unterschieden. Als Oberklasse für alle Arten von Beobachtungen wird das Konzept `Observation` eingeführt. Eine Beobachtung bezieht sich zunächst immer auf ein Konzept `Feature`, das als hierarchisch gliederbares Konzept für alle Merkmale dient, auf die sich Beobachtungen beziehen können. Merkmale können Messpunkte, Bauwerksabschnitte, Bauwerke usw. sein. Für quantitative Beobachtungen wird das Konzept `Measurement` eingeführt, das einen Messwert als das Ergebnis eines Beobachtungsvorganges betrachtet, wobei das Ergebnis einen Wert bzw. eine Quantität (`Quantity`) und eine Einheit (`Unit`) besitzt.

Qualitative Beobachtungen werden durch das Konzept `CategoryObservation` abgebildet, das keinen Zahlenwert, sondern eine Kategorie als Ergebnis liefert. Zu erfassende Eigenschaften werden durch die Konzepte `PhenomenonType` und `Phenomenon` abgebildet. Ein

`PhenomenonType` bildet dabei die Art der zu erfassenden Messgröße (z.B. Temperatur oder Beschleunigung) und das Konzept `Phenomenon` die bei qualitativen Beobachtungen möglichen Kategorien (z.B. gering, mittel, stark) ab. Die räumliche Position und der Zeitpunkt der Beobachtung werden ebenfalls in eigenen Konzepten (`Location` bzw. `TimeRecord`) realisiert.

Um die Verwendung von unterschiedlichen Einheiten und ihre automatisierte Umrechnung zu ermöglichen, werden Einheiten im Domänenmodell explizit durch das Konzept `Unit` modelliert. Das Konzept ermöglicht die Modellierung von Basiseinheiten und abgeleiteten Einheiten sowie des Ableitungsprozesses von Einheiten.

Abbildung 4.11 zeigt das Domänenmodell mit den wichtigsten Konzepten für Beobachtungen und Beobachtungs- bzw. Messprozesse.

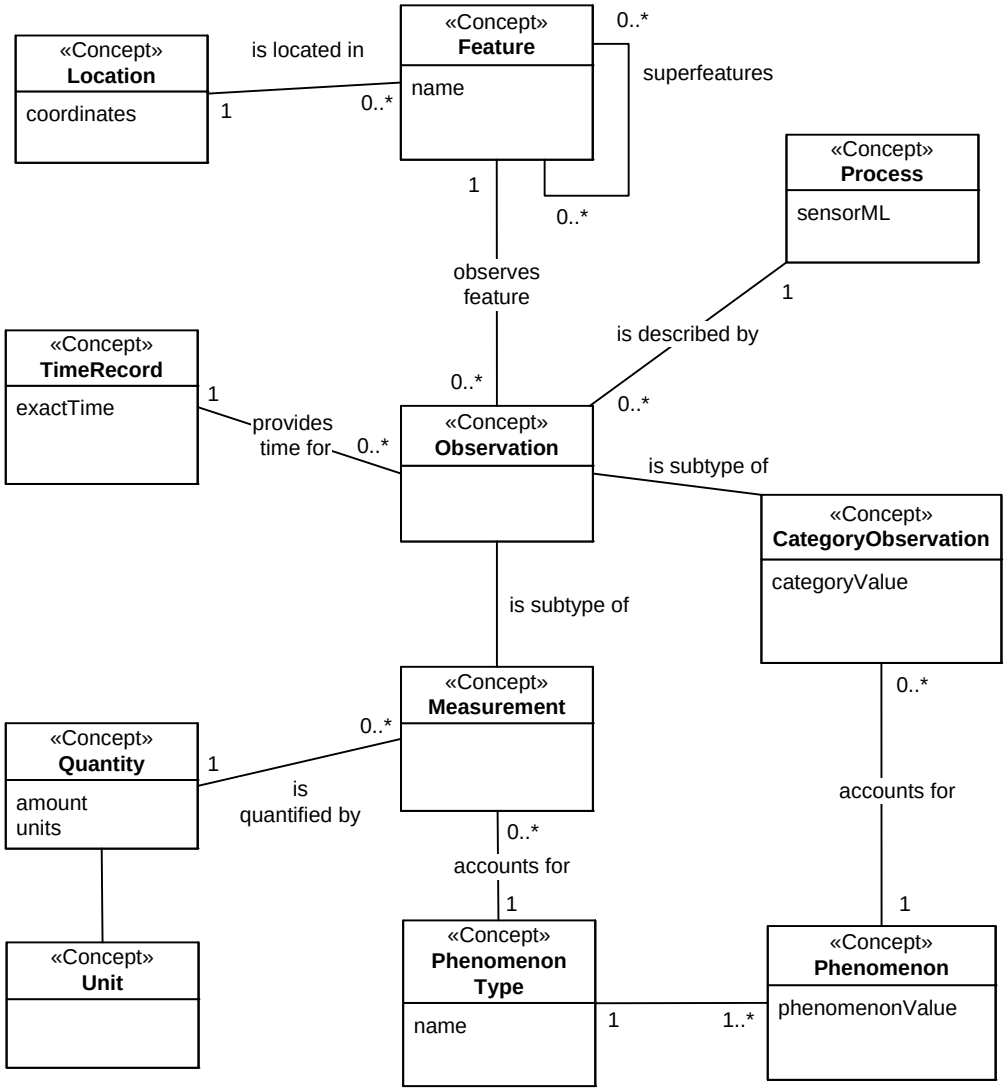


Abbildung 4.11: Domänenmodell für alle messwertbezogenen Konzepte des Bauwerksmonitorings

Informationen über die verwendeten Mess- und Datenerfassungssysteme und den Beobachtungsprozess werden durch die Nutzung der Sensorbeschreibungssprache SensorML [Open Geospatial Consortium 09] aufgenommen. SensorML ist eine in XML definierte Auszeichnungssprache zur Beschreibung von Sensoren, Sensordaten und

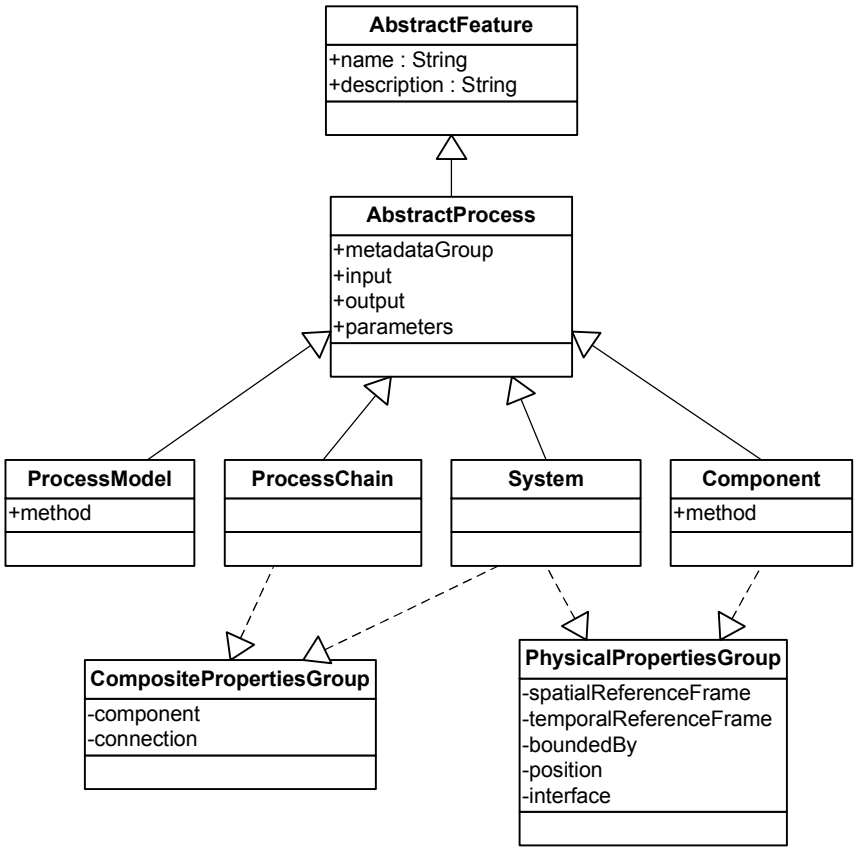


Abbildung 4.12: SensorML-Datenmodell zur Abbildung von Sensoren und Messprozessen [Botts 07]

Messvorgängen und wurde mit dem Ziel entwickelt, Standardmodelle zur Ausführung von Messvorgängen und eine anwendungsneutrale XML-Kodierung bereitzustellen [Visualization-Analysis Sensor Technology 09]. Inzwischen ist SensorML vom Open Geospatial Consortium, einer gemeinnützigen Standardisierungsorganisation auf dem Gebiet der raumbezogenen Informationsverarbeitung [Wikipedia 08, „Open Geospatial Consortium“], als Standard anerkannt.

Innerhalb des Bauwerksmonitoringsystems werden die in SensorML-kodierten Informationen dazu verwendet, ein dynamisches Auffinden von Sensoren und einen verteilten Zugriff auf Mess- und Datenerfassungssysteme zu ermöglichen. Darüber hinaus werden die Voraussetzungen für die semantische Interoperabilität mit anderen Computersystemen geschaffen, da der systemübergreifende Austausch von Informationen über Sensoren und Sensordaten in einem standardisierten Datenformat möglich ist. Die Sensorikagenten des Bauwerksmonitoringsystems liefern auf Anfrage in SensorML kodierte Dokumente, die von den anderen Agenten ausgewertet werden können. Zur internen Repräsentation und Verarbeitung der aus den SensorML-Dokumenten stammenden Informationen nutzen die Agenten des Bauwerksmonitoringsystems, sofern möglich, bestehende Werkzeuge und Implementierungen.

4.6.2 Integration von proprietären Messdatenformaten

Messdaten werden von den heute verfügbaren Mess- und Datenerfassungssystemen nach der Erfassung üblicherweise in proprietäten Daten- bzw. Dateiformaten abgelegt. Diese Forma-

te sind jedoch herstellerabhängig und bisher nicht standardisiert. Die Integration von unterschiedlichen, proprietären Messdatenformaten in das Bauwerksmonitoringsystem erfolgt deshalb durch die Bereitstellung von mehreren, spezialisierten Transformationsagenten, die entsprechende Messdaten aus den Messdateien extrahieren und in das intern verwendete Datenmodell übertragen.

Die Rolle des Transformationsagenten wird dabei vom Datenverarbeitungsagenten übernommen. Für jedes Messdatenformat wird ein eigener Datenverarbeitungsagent implementiert. Das Auffinden der geeigneten Datenverarbeitungsagenten wird zur Laufzeit sichergestellt, indem die Datenverarbeitungsagenten in ihrer Dienstbeschreibung eine Eigenschaft (`format-type`) zur Beschreibung des Datenformates veröffentlichen.

Teil III

Umsetzung

Kapitel 5

Implementierung des Bauwerksmonitoringsystems RAMON

Zur softwaretechnischen Unterstützung der messtechnischen Dauer- und Langzeitüberwachung von Bauwerken wird das prototypische Bauwerksmonitoringsystem ***RAMON*** *(engl. Robust Agent-based Structural MONitoring System — Robustes agentenbasiertes Bauwerksmonitoringsystem) implementiert. In diesem Kapitel wird die Implementierung des Bauwerksmonitoringsystems auf der Basis des im vorangegangen Kapitel durchgeführten Entwurfs erläutert. Im Vordergrund steht hierbei die softwaretechnische Umsetzung der Agententypen, die jeweils Einzelschritte des Monitoringablaufs abbilden und entsprechende Fachlogik aufnehmen.*

5.1 Vorbemerkungen

Das Bauwerksmonitoringsystem RAMON wird als ein verteiltes Multiagentensystem realisiert. Den Mittelpunkt des Bauwerksmonitoringsystems bildet ein agentenbasiertes Kernmodul, das alle entwickelten Agenten und ihre Laufzeitumgebung enthält (vgl. Abb. 5.1). Weitere Systembestandteile sind die Hard- bzw. Softwareressourcen (i) Sensorik, (ii) Analyse, (iii) Datenspeicherung und (iv) Grafische Benutzungsschnittstelle. Die Ressourcen werden mittels agentenorientierter Konzepte, bevorzugt durch die Einführung spezialisierter Agententypen sowie auf unterer Ebene mittels objektorientierter Konzepte, in das Bauwerksmonitoringsystem integriert. Besonderer Wert wird dabei auf die Integration von externen Mess- und Datenerfassungssystemen (MDES) gelegt, die als autonome Systeme in das Multiagentensystem eingebunden werden.

Die Kommunikation innerhalb des agentenbasierten Kernmoduls erfolgt ausschließlich auf der Basis der Agentenkommunikationssprache FIPA-ACL, wobei der Nachrichteninhalt je nach Kommunikationssituation entweder in der Inhaltssprache FIPA-SL, einer Fachsprache wie z.B. SensorML, oder in „flachem Text“[1] ausgedrückt werden kann. Die Interaktion mit den Ressourcen des Bauwerksmonitoringsystems wird auf Sub-Agenten-Ebene mittels Standardelementen der verwendeten Programmiersprache Java oder zusätzlicher Bibliotheken realisiert.

[1] Flache Texte oder flache Dateien (engl. flat files) dienen der Datenspeicherung in Textform, wobei die zu speichernden Datensätze in einem bestimmten Format nacheinander in einer Liste angeordnet werden.

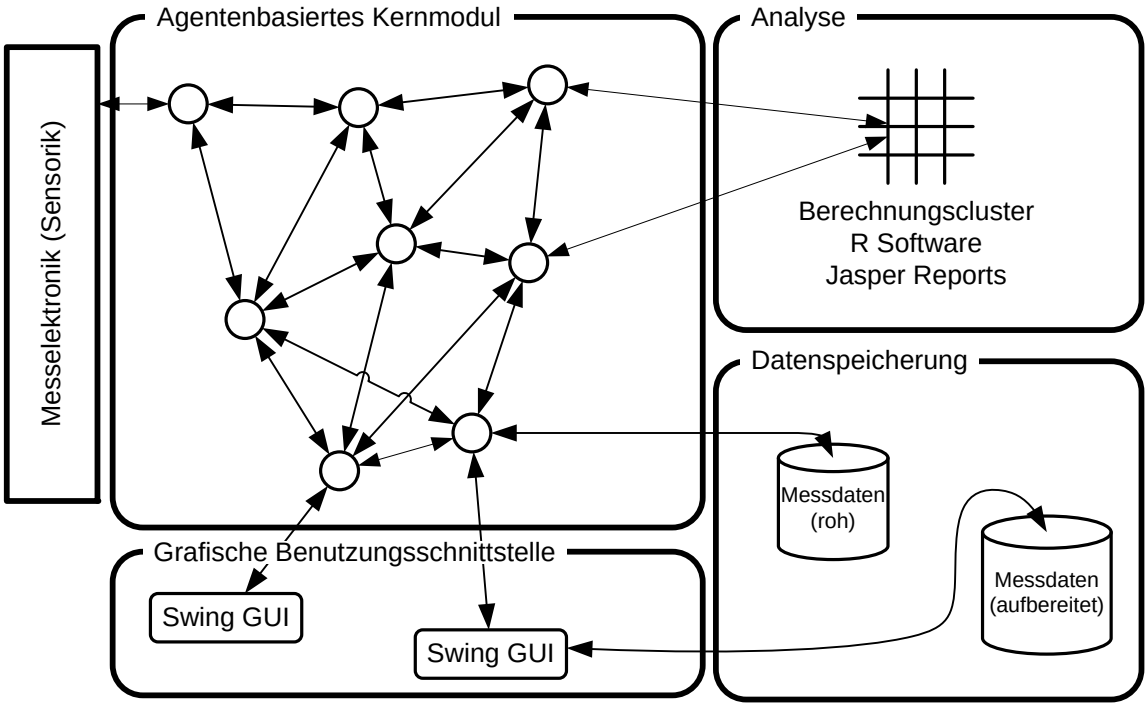


Abbildung 5.1: Grobarchitektur des Bauwerksmonitoringsystems RAMON

Als Basis für die Implementierung des Bauwerksmonitoringsystems wird die frei verfügbare Agentenplattform JADE[2] [JADE 08] verwendet. JADE zeichnet sich durch eine sehr gute Programmierschnittstelle und die Bereitstellung zahlreicher agentenorientierter Entwurfsmuster aus. JADE wird aber auch gewählt, weil die Agentenplattform FIPA-konform ist und somit eine Erweiterbarkeit, z.B. durch die Kopplung mit anderen Agentensystemen, möglich ist.

Im Folgenden wird die Implementierung der einzelnen Agententypen erläutert. Die Erläuterung orientiert sich dabei an den in Kapitel 4 identifizierten und formalisierten Arbeitsschritten des Bauwerksmonitorings.

5.2 Erfassung von Messdaten

Die Erfassung von Messdaten wird durch zwei spezialisierte Agententypen unterstützt. Einerseits wird zur aktiven Steuerung und Interaktion mit Mess- und Datenerfassungssystemen ein Sensorikagent in der Klasse `HardwareSensorsAgent` verwendet. Andererseits wird zur losen (dateibasierten) Kopplung mit den bestehenden Mess- und Datenerfassungssystemen ein Messdateiagent in der Klasse `FileSensorsAgent` implementiert. In den folgenden Unterabschnitten wird zunächst die Implementierung der spezifizierten Verantwortlichkeiten in die Agententypen und anschließend die Realisierung der Kommunikation mit Mess- und Datenerfassungssystemen erläutert.

5.2.1 Sensorikagent

Der Sensorikagent wird im Paket `de.rub.bi.inf.monitoring.sensors` realisiert. Das Paket besteht aus dem Sensorikagenten `HardwareSensorsAgent` sowie den Verhaltensbausteinen

[2] vgl. hierzu auch Unterabschn. 3.4.3

zur Abbildung des Agentenverhaltens. Die Verhaltensbausteine werden auf der Basis der Verantwortlichkeitentabelle in C.1 identifiziert und in entsprechenden Klassen softwaretechnisch umgesetzt. In Abb. 5.2 sind die Verhaltensbausteine des Sensorikagenten sowie der Kontrollfluss innerhalb des Agententypen schematisch dargestellt[3].

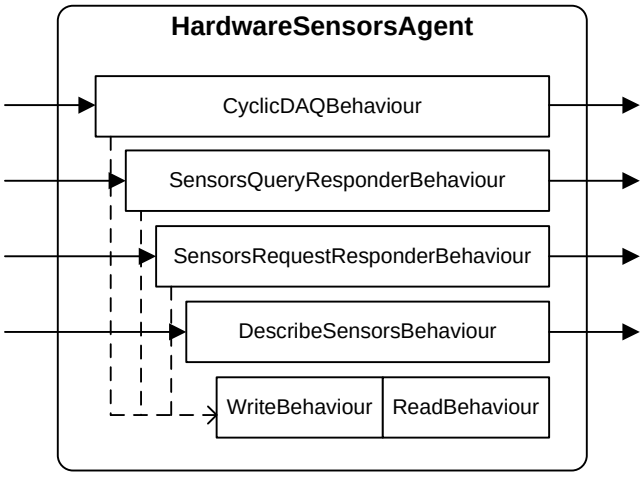


Abbildung 5.2: Verhaltensbausteine des Sensorikagenten

Es werden insgesamt sechs Verhaltensbausteine implementiert, die die Hauptverantwortlichkeiten, die (i) zeitgesteuerte Erfassung von Messgrößen, (ii) Kommunikation mit den Mess- und Datenerfassungssystemen über die physikalischen Schnittstellen des Messrechners und die (iii) Bereitstellung von aktuellen Messwerten („Online-Daten“) abbilden.

Die *zeitgesteuerte Erfassung von Messgrößen* wird als übergeordneter, steuernder Verhaltensbaustein des Sensorikagenten aufgefasst und in der Klasse `CyclicDAQBehaviour` implementiert. `CyclicDAQBehaviour` wird hierzu als periodisch ausgeführter Verhaltensbaustein ausgelegt, der die Bausteine `ReadBehaviour` und `WriteBehaviour` (s.u.) zur Kommunikation mit den Mess- und Datenerfassungssystemen verwendet. Das anschließende Schreiben der Messdaten („Logging“) wird durch eine Methode unterstützt, die den einfachen Zugriff auf die zu schreibende Messdatei ermöglicht. Der `HardwareSensorsAgent` wird standardmäßig so implementiert, dass für jeden Tag eine neue Messdatei erzeugt wird. Alternativ kann der Agent aber auch so angepasst werden, dass bei Überschreiten einer bestimmten Dateigröße eine neue Datei erzeugt wird.

Die *Kommunikation mit Mess- und Datenerfassungssystemen* wird als essentiell wichtige Verantwortlichkeit des Sensorikagenten in zwei spezifischen Verhaltensbausteinen, `ReadBehaviour` und `WriteBehaviour`, umgesetzt, die von den anderen Verhaltensbausteinen des Sensorikagenten zur Kommunikation mit einem an den Rechner angeschlossenen Mess- bzw. Datenerfassungsgerät genutzt werden können. Die Bausteine dienen der hardwarenahen Kommunikation und erlauben die Konfiguration der Schnittstellenparameter. Die benötigte Funktionalität wird mittels der freien Java-Bibliothek Java Communications API[4] [Sun Microsystems, Inc. 09] implementiert, die von Sun speziell zur Kapselung der seriellen und parallelen Hardwareschnittstellen eines Rechners entwickelt wurde. Die Implementierung

[3]Zur Darstellung der Verhaltensbausteine und des agenteninternen Kontrollflusses wird eine eigene Darstellungsart verwendet. Die Verhaltensbausteine werden darin durch Rechtecke symbolisiert. Der Kontrollfluss zwischen den Bausteinen wird durch eine gestrichelte Linie mit offenem Pfeil veranschaulicht. Empfängt oder sendet ein Verhaltensbaustein Nachrichten, so wird dieses durch einen horizontalen Linie mit ausgefülltem Pfeil dargestellt.

[4]wird im Folgenden als Comm API bezeichnet

der Kommunikation über die serielle und parallele Schnittstelle eines Rechners wird im folgenden Unterabschnitt 5.2.3 näher erläutert.

Zur *Bereitstellung aktueller Messwerte* an die Agenten des Bauwerksmonitoringsystems werden die Verhaltensbausteine `SensorsQueryResponderBehaviour` und `SensorsRequestResponderBehaviour` implementiert, die empfangene Nachrichten anderer Agenten verarbeiten und — nach der Kommunikation mit dem MDES — aktuelle Messwerte zurückliefern. Die Verhaltensbausteine greifen hierzu auf die oben beschriebenen Bausteine `WriteBehaviour` und `ReadBehaviour` zu.

Abbildung 5.3 zeigt die Klassen des Paketes als UML-Klassendiagramm.

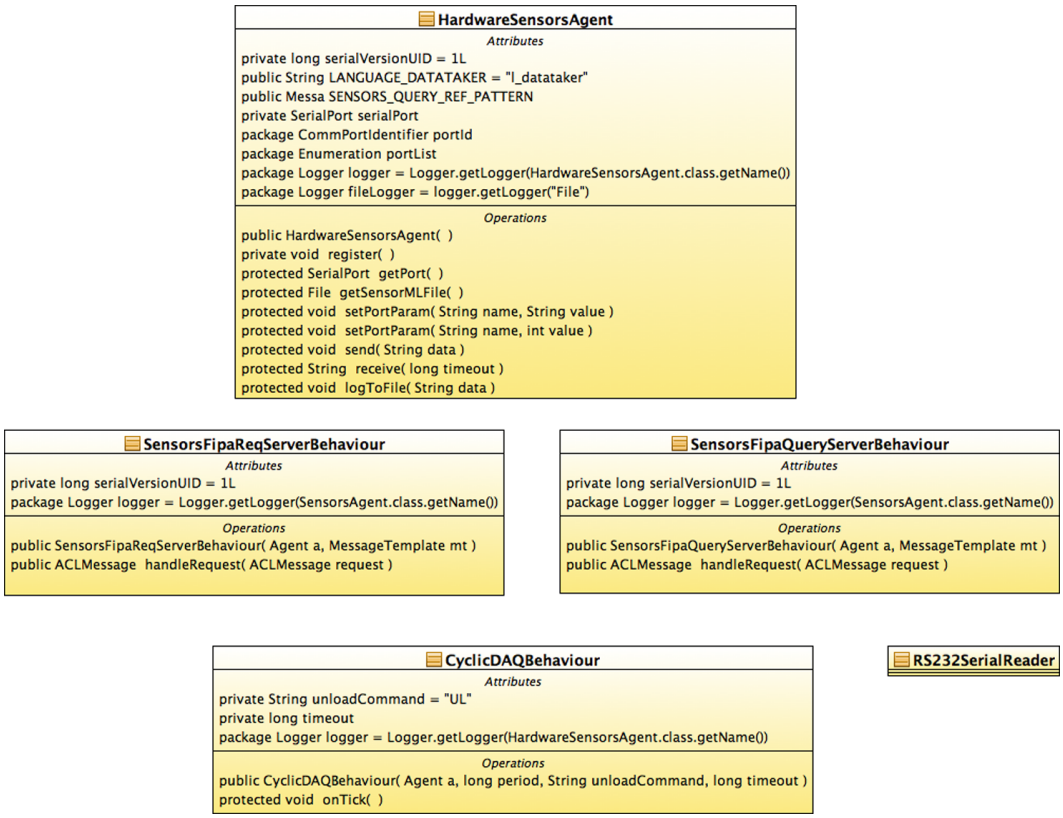


Abbildung 5.3: Paket `de.rub.bi.inf.monitoring.sensors` (UML-Klassendiagramm)

5.2.2 Messdateiagent

Zur Kapselung und Bereitstellung von Messdaten, die in Messdateien abgelegt sind, wird ein spezialisierter Messdateiagent in der Klasse `FileSensorsAgent` implementiert. Gemäß der Spezifikation in der Interaktionstabelle C.4.2 interagiert der Agententyp mit den anderen Agententypen des Bauwerksmonitoringsystems, wenn diese die Daten aus der Messdatei oder Metainformationen zur Messdatei anfordern. Die Interaktionen werden durch insgesamt drei Verhaltensbausteine abgebildet (s. Abb. 5.4).

Der Verhaltensbaustein `FileResponderBehaviour` verarbeitet die Anfragen nach dem Inhalt der Messdatei und liefert als Ergebnis den Inhalt der gekapselten Messdatei an den anfragenden Agenten zurück. Der Verhaltensbaustein greift hierzu auf den Baustein `ReadBehaviour` zurück, der den aktuellen Inhalt der Messdatei ausliest.

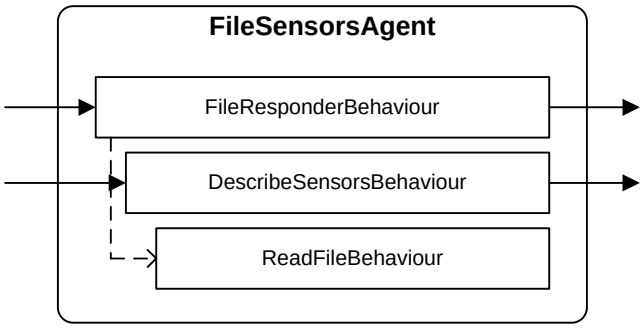


Abbildung 5.4: Verhaltensbausteine des Messdateiagenten

Informationen über die Messdatei und den Messprozess können von den anderen Agenten des Bauwerksmonitoringsystems erfragt werden, indem sie dem Messdateiagenten eine Nachricht mit der Agentenaktion `describe-sensors` senden. Alle Nachrichten mit diesem Inhalt werden in dem Verhaltensbaustein `DescribeSensorsResponder` verarbeitet. In der Antwortnachricht werden dann SensorML-kodierte Informationen über den Messprozess verschickt, die vom anfragenden Agententypen verarbeitet werden können.

5.2.3 Kommunikation mit Mess- und Datenerfassungssystemen

Zur Integration leistungsfähiger Mess- und Datenerfassungssysteme musste die hardwarenahe Kommunikation mit den Geräten hergestellt werden. Die Kommunikation wird dazu am Beispiel eines Datenloggers Datataker DT600 prototypisch umgesetzt. Der Datenlogger DT600 ist ein leistungsfähiger, mikroprozessorgesteuerter Datenlogger mit Anschlussmöglichkeiten für bis zu 40 Sensoren, der eine serielle Schnittstelle (RS-232) besitzt und über diese steuer- und administrierbar ist. In den `HardwareSensorsAgent` werden deshalb spezifische Fähigkeiten zur Kommunikation über die RS-232-Schnittstelle des Rechners implementiert.

Wie oben erwähnt, wird die Kommunikation mittels der Java-Klassenbibliothek Comm API realisiert. Die Hardwareschnittstellen werden im Comm API durch spezifische Klassen repräsentiert, die in einer Anwendung zur Kommunikation mit einem logischen oder physikalischen Gerät verwendet werden können. Das implementierte Konzept zum Zugriff auf die Mess- und Datenerfassungssysteme ist in Abbildung 5.5 schematisch dargestellt. Der Sensorikagent verwendet auf oberster Ebene die Klassen und Methoden des Comm API (Paketname `javax.comm`), um mit dem physikalischen oder logischen Gerät zu kommunizieren. Auf der Ebene des Comm API werden die Java-Anweisungen dann auf die native Ebene übersetzt und die physikalische Kommunikation mit dem Gerät über die Schnittstelle (RS-232 I/O) durchgeführt. Intern werden hierzu native Treiber verwendet, die mit der Klassenbibliothek ausgeliefert werden.

Das Comm API abstrahiert dabei von der Hardware, indem die auf Hardwareebene über die verfügbaren Leitungen der Schnittstelle übertragenen Daten bzw. Signale durch entsprechende Software-Ereignisse repräsentiert werden. Es stehen mehrere Steuer- und Signalleitungen zur Verfügung, die zur Datenübertragung sowie zur Steuerung des Datenflusses über die Schnittstelle genutzt werden können. Die genaue Verkabelung und die Bedeutung der Leitungen kann z.B. in dem Wikipedia-Artikel [Wikipedia 08, „RS-232“] nachgelesen werden.

Zur Implementierung der Kommunikation mit dem physikalischen Gerät werden insbesondere die Klassen `CommPortIdentifier`, `SerialPort` und `ParallelPort` aus dem Comm API genutzt. `SerialPort` und `ParallelPort` sind Klassen zur Kapselung der seriellen bzw.

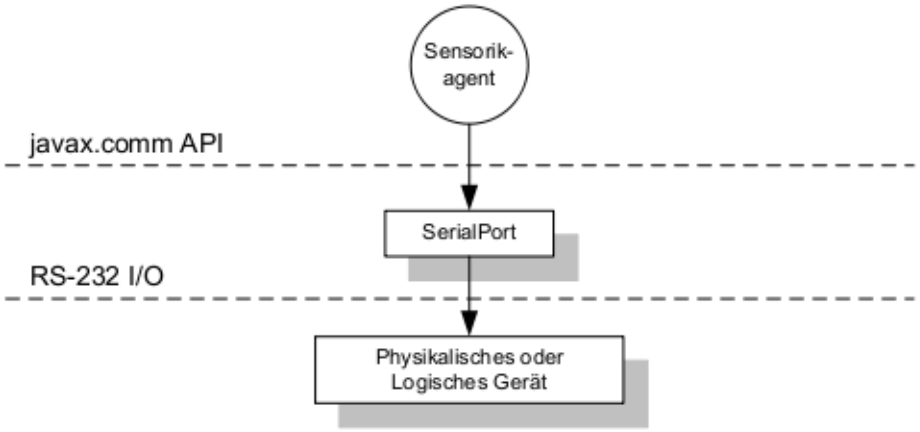


Abbildung 5.5: Zugriff des Sensorikagenten auf Mess- und Datenerfassungsgeräte mittels des Comm API

parallelen Schnittstelle, während die Klasse `CommPortIdentifier` als zentrale Verwaltungs- und Fabrikklasse Methoden zur Enumeration aller vorhandenen Hardwareschnittstellen eines Rechners sowie zum Öffnen der Schnittstellen für Eingabe- und Ausgabe-Operationen bereitstellt. Listing 5.1 veranschaulicht die Nutzung des Comm API. Mittels der Klasse `CommPortIdentifier` werden zunächst die seriellen und parallelen Hardwareschnittstellen des Rechners durchlaufen. Die Instanziierung der gesuchten seriellen Schnittstelle erfolgt dann in Zeile 20.

Listing 5.1: Instanziierung einer seriellen Schnittstelle mittels des Comm API

```
1  SerialPort serialPort;
2  Enumeration portList;
3  CommPortIdentifier portId;
4
5  String serPort = "COM1";
6
7  portList = CommPortIdentifier.getPortIdentifiers();
8
9  while (portList.hasMoreElements())
10 {
11         portId = (CommPortIdentifier) portList.nextElement();
12         if (portId.getPortType() == CommPortIdentifier.PORT_SERIAL)
13         {
14                 if (portId.getName().equals(serPort))
15                 {
16                         logger.debug("Found port: " + serPort);
17                         portFound = true;
18                         try
19                         {
20                                 serialPort = (SerialPort) portId.open(
21                                         "HardwareSensorsAgent", 2000);
22                         }
23                         catch (PortInUseException e)
24                         {
25                                 logger.fatal(e.getMessage());
26                         }
27                         break;
28                 }
```

```
29          }
30  }
31  if (!portFound)
32  {
33          logger.fatal("port " + serPort + " not found.");
34  }
```

5.3 Verteilung von Messdaten

5.3.1 Datenverteilungsagent

Die zur Verteilung der erfassten Messgrößen erforderlichen Arbeitsschritte werden im `DataAcquisitionAgent` implementiert. Die Hauptverantwortlichkeit des Agententypen, die Verteilung der erfassten Messgrößen, wird im zeitgesteuert ausführbaren Verhaltensbaustein `ScheduledDAQBehaviour` implementiert. Der Baustein nutzt intern den Verhaltensbaustein `ExtractLoadBehaviour`, der die Logik zur Extraktion der Messdaten aus den von den Sensorik- und Messdateiagenten des Bauwerksmonitoringsystems erzeugten bzw. gekapselten Messdateien enthält. Das Versenden der erfassten Messgrößen wird schließlich im Verhaltensbaustein `ProcessingInitiatorBehaviour` implementiert. Die Verhaltensbausteine des Datenverteilungsagenten sind in Abbildung 5.6 dargestellt.

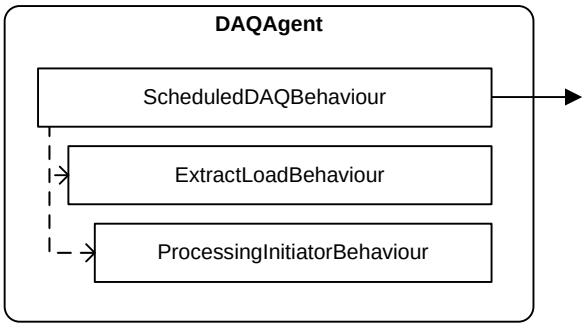


Abbildung 5.6: Verhaltensbausteine des Datenverteilungsagenten

Der Agententyp ist durch die Interaktion mit den anderen Agententypen des Bauwerksmonitoringsystems in der Lage, die Rohdaten aus den entfernten Gerätespeichern und Messdateien zu extrahieren. Die Übertragung der Daten kann über verschiedene Kommunikationswege erfolgen. In Abhängigkeit vom Verteilungskonzept der Agenten ist die Übertragung der Daten z.B. über das Mobilfunknetz (GSM/GPRS) oder drahtgebunden über das Internet (IP/Ethernet) möglich.

Um die Verteilung von erfassten Messwerten flexibel steuern zu können, wird ein an die Funktionsweise des Unix-Systemdaemons Cron[5] [Wikipedia 08, „Cron“] angelehnter Mechanismus in den Datenverteilungsagenten implementiert. Die auszuführende Aufgabe wird dabei durch einen einfachen, mehrteiligen Ausdruck beschrieben. Dieser Ausdruck setzt sich aus mehreren Zeitfeldern für Minuten, Stunden, den Tag des Monats, den Monat und den Wochentag zusammen. Tabelle 5.1 enthält einige beispielhafte cron-Ausdrücke.

Der Datenverteilungsagent wird so programmiert, dass dem Agententypen beim Starten ein Cron-Ausdruck und ein Agentenidentifizierer zu übergeben sind. Der Datenverteilungs-

[5] von chronos, griechisch Zeit

Tabelle 5.1: Beispiele für cron-Ausdrücke und Ausführung

M	S	T	M	W	Ausführung
3	*	*	*	*	3 Minuten nach der vollen Stunde
*/10	*	*	*	*	alle 10 Minuten
59	23	*	*	0	einmal pro Woche am Sonntag um 23:59 Uhr
1	0	*	*	*	täglich um 00:01 Uhr
30,45	1	*	*	1-5	montags bis freitags jeweils um 01:30 und 01:45 Uhr

agent führt seine Verantwortlichkeit dann nach dem durch den Cron-Ausdruck vorgegebenen Zeitplan wiederkehrend aus. Hierzu wird die leichtgewichtige Java-Bibliothek cron4j [Sauron Software 09] in den Agententypen eingebunden, die für die zeitgesteuerte Ausführung der einzelnen Verhaltensbausteine verantwortlich ist. Der zu übergebende Agentenidentifizierer dient der Identifikation des Sensorik- bzw. Messdateiagenten, mit dem der Datenverteilungsagent interagiert, und muss mit dem Bezeichner übereinstimmen, den ein Messdateiagent bzw. Sensorikagent in seiner Dienstbeschreibung veröffentlicht hat. Das Auffinden des Agenten geschieht dann dynamisch auf der Basis des Gelbe Seiten-Dienstes der Agentenplattform.

Um die Datenverteilung möglichst performant zu gestalten, wird in den Datenverteilungsagenten schließlich Fachlogik implementiert, die einen Dateivergleich ermöglicht (vgl. Unterabschn. 4.4.2). Die aus den Gerätespeichern der Datenerfassungssysteme ausgelesenen Messwerte werden hierbei als Text aufgefasst, der mit den im vorherigen Zyklus ausgelesenen Messwerten verglichen wird. Der Dateivergleich wird mit der bestehenden Klasse [Fraser 09] realisiert und in den Datenverteilungsagenten integriert.

Der Agententyp und dessen Verhaltensbausteine werden im Paket `de.rub.bi.inf.monitoring.daq` implementiert, das in Abbildung 5.7 als Klassendiagramm dargestellt ist.

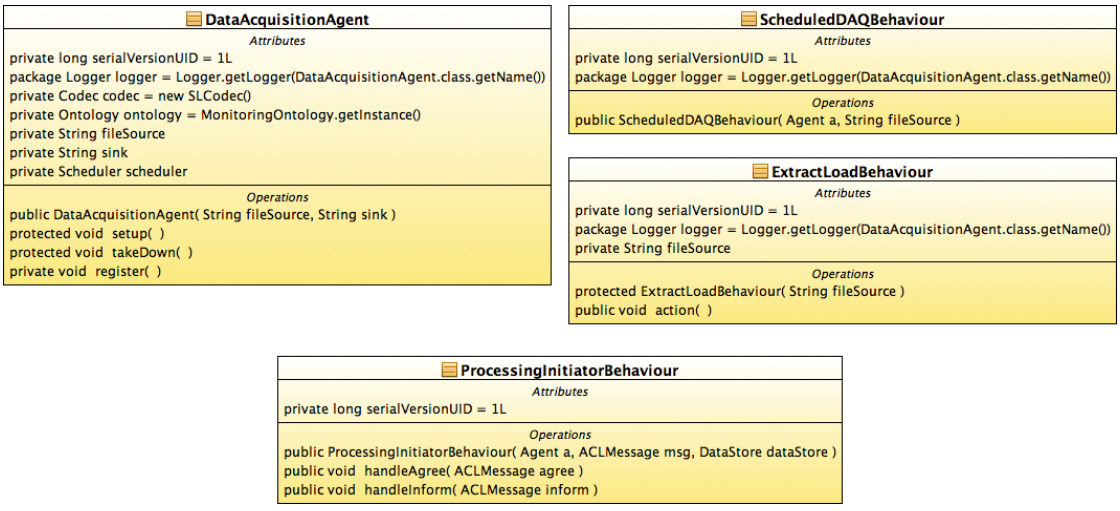


Abbildung 5.7: Paket `de.rub.bi.inf.monitoring.daq`

5.4 Aufbereitung von Messdaten

5.4.1 Datenverarbeitungsagent

Die Aufbereitung von Messdaten wird in dem spezialisierten Agententypen `DataProcessingAgent` implementiert. Der Agententyp wird mit mehreren Verhaltensbausteinen ausgestattet, die die zur Verarbeitung der Messdaten erforderliche Fachlogik aufnehmen. Abbildung 5.8 zeigt die Verhaltensbausteine des Datenverarbeitungsagenten.

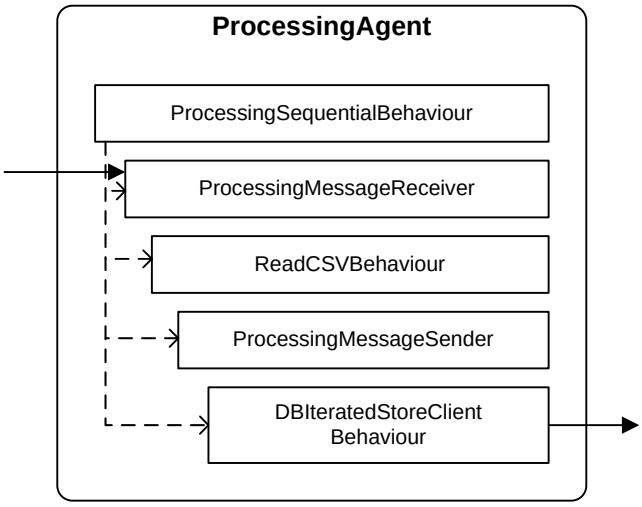


Abbildung 5.8: Verhaltensbausteine des Datenverarbeitungsagenten

Die Aufbereitung der Messdaten wird hierbei als ein sequentiell ablaufender Prozess (vgl. Abb. 5.9) aufgefasst, der in einem übergeordneten Baustein, `ProcessingSequentialBehaviour`, implementiert wird. Der Aufbereitungsprozess wird durch die Anfrage eines Datenverteilungsagenten von außen angestoßen, indem dieser dem Datenverarbeitungsagenten als Inhalt einer Nachricht die erfassten Messwerte sendet. Der Datenverarbeitungsagent nimmt die erfassten Messdaten im Verhaltensbaustein `ProcessingMessageReceiver` entgegen und startet daraufhin die Verarbeitung. Die im Rohdatenformat (z.B. CSV[6]) vorliegenden Messdaten werden danach im Baustein `ReadCSVBehaviour` anhand des jeweiligen Trennzeichens zerlegt und unter Anwendung von Fachwissen in das Java-Objektmodell umgewandelt. Anschließend werden die umgewandelten Messdaten im Verhaltensbaustein `ProcessingMessageSender` für den Versand an den Datenspeicherungsagenten verbereitet. Der Versand der Messdaten wird schließlich mittels des Verhaltensbausteins `DBIteratedClientBehaviour` durchgeführt, der die Daten in mehreren Paketen übermittelt, da aufgrund der Serialisierung der Messdatenobjekte in das textbasierte ACL-Nachrichtenformat eine relativ große Datenmenge und als Folge daraus ein Speicherüberlauf entstehen kann[7].

Die Zerlegung der Messdaten wird mittels der freien Java-Bibliothek Super CSV [Graversen 09] implementiert, da die Bibliothek den Verarbeitungsvorgang von CSV-Dateien durch einen internen Validierungsmechanismus und ein konsequent objektorientiertes Konzept sehr gut unterstützt. Die Anpassung des Datenverarbeitungsagenten an spezifische Datenformate muss dabei für jedes verwendete Dateiformat einzeln erfolgen, da sich der Verarbeitungsvorgang nicht verallgemeinern lässt. Für jedes Dateiformat ist somit ein spezifischer

[6] engl.: comma-separated values, Standard für einfach strukturierte Textdateien
[7] vgl. hierzu auch Unterabschn. 5.5.1

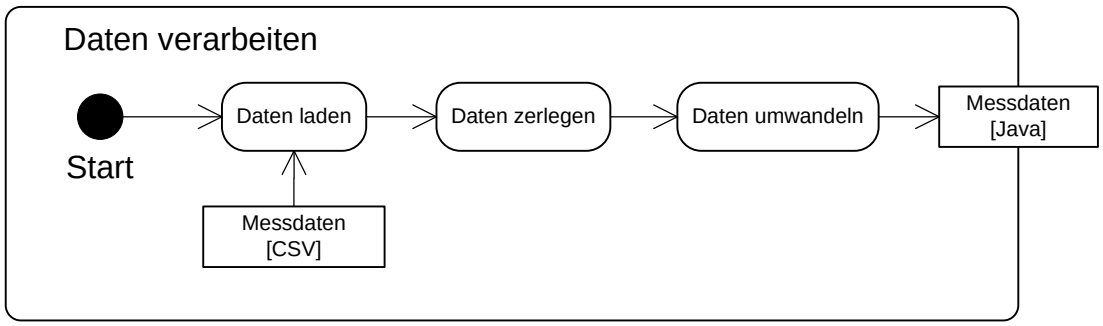


Abbildung 5.9: Einzelschritte zur Datenverarbeitung (UML-Aktivitätsdiagramm)

Datenverarbeitungsagent innerhalb des Bauwerksmonitoringsystems vorzusehen. Zur Identifikation eines Datenverarbeitungsagenten wird in der Dienstbeschreibung des Datenverarbeitungsagenten die Eigenschaft `format` eingeführt, die Informationen über das Dateiformat enthält.

5.5 Pflege von Messdaten

5.5.1 Datenspeicherungsagent

Die Verwaltung und Archivierung erfasster Messdaten wird einem Datenspeicherungsagenten übertragen, der prototypisch in der Klasse `DatabaseAgent` umgesetzt ist. Seine Hauptverantwortlichkeit besteht darin, Anfragen anderer Agententypen zur Verwaltung von Messdaten entgegenzunehmen und Aufträge auszuführen. Hierzu wird der Datenspeicherungsagent mit vier Verhaltensbausteinen zur Verarbeitung der verschiedenen Anfragen ausgestattet (vgl. Abb. 5.10).

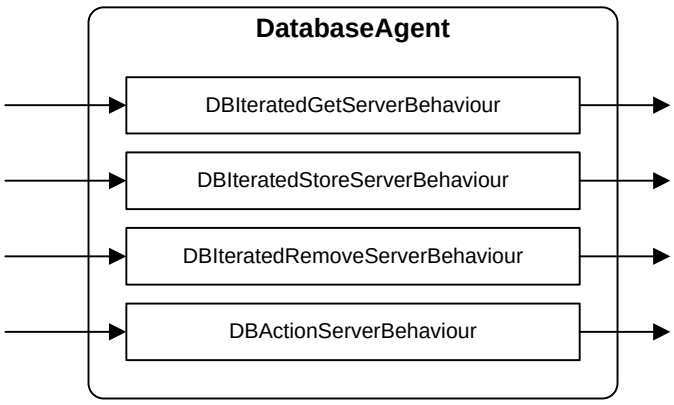


Abbildung 5.10: Verhaltensbausteine des Datenspeicherungsagenten

Aufbauend auf der Interaktionstabelle C.4.5 ist der Datenspeicherungsagent für die Interaktion über die Protokolle FIPA-Request und FIPA-Query ausgelegt. Die zur Speicherung bzw. Verwaltung auszuführenden Operationen (Erzeugen, Lesen, Aktualisieren und Entfernen von Einträgen) werden durch speziell auf das Monitoringproblem zugeschnittene Agentenaktionen, wie z.B. `get-observations` oder `remove-observations`, abstrahiert und mittels der

entwickelten Bauwerksmonitoring-Ontologie[8] für alle Agententypen des Bauwerksmonitoringsystems verfügbar gemacht.

Innerhalb des Datenspeicherungsagenten wird die Verarbeitung der Agentenaktionen an die Verhaltensbausteine `DBIteratedStoreServerBehaviour`, `DBIteratedGetServerBehaviour` und `DBIteratedRemoveServerBehaviour` delegiert. Im jeweiligen Baustein wird die Agentenaktion extrahiert und die geforderte Operation auf dem Datenbanksystem durchgeführt. Als Inhalt der Agentenaktion können dabei sowohl Java-Objekte als auch direkt an das Datenbanksystem gerichtete, textbasierte Anweisungen übermittelt werden. Als geeignete Sprache wird die SQL[9]-ähnliche, aber stärker objektorientiert ausgelegte Abfragesprache HQL[10] verwendet.

Besonderes Augenmerk wurde bei der Implementierung des Datenspeicherungsagenten auf die Übertragung der Messdaten gerichtet. Da es sich bei der Kommunikation zwischen den Agenten des Bauwerksmonitoringsystems um eine verteilte Kommunikation handelt, müssen Messdaten im sendenden Agenten serialisiert, in serialisierter Form übertragen und im empfangenden Agenten dann zurück in das Java-Objektmodell deserialisiert werden. Zur Verdeutlichung der serialisierten, FIPA-SL basierten Darstellung ist in Listing 5.2 beispielhaft ein einzelner Messwert mit den relevanten Informationen zur Messung dargestellt.

Listing 5.2: Repräsentation eines Messwertes in FIPA-SL

```
(Measurement
              :resultTime
                (TimePoint
                  :id 0
                  :milliseconds "1202252400000")
              :samplingTime
                (TimePoint
                  :id 0
                  :milliseconds "1202252400000")
              :feature
                (Feature
                  :name D2L1
                  :superfeatures
                    (sequence
                      (Feature
                        :name "Profil D2"
                        :superfeatures
                          (sequence
                            (Feature
                              :name Talmitte
                              :superfeatures
                                (sequence
                                  (Feature
                                    :name Ennepetalsperre
                                    :superfeatures (sequence)
                                    :id 1))
                              :id 4))
                        :id 6))
                  :id 12)
              :id 0
              :phenomenonType
```

[8] vgl. Unterabschn. 5.8

[9] engl.: Structured Query Language, Datenbanksprache für relationale Datenbanksysteme

[10] Hibernate Query Language, Abfragesprache des Mapping-Frameworks Hibernate

```
32                  (Temperature
33                    :name Temperature
34                    :phenomena (sequence)
35                    :id 0)
36                  :quantity
37                    (Quantity
38                      :units
39                        (Kelvin
40                          :name Kelvin
41                          :symbol K
42                          :id 0)
43                      :amount 4.828000068664551
44                      :id 0))
```

Die serialisierte Darstellung des Messwertes beginnt mit den Slots für den Zeitpunkt der Messung `:samplingTime` und den Zeitpunkt des Ergebnisses `:resultTime`. Die Informationen zum Objekt bzw. zur Eigenschaft `:feature`, auf die sich die Messung bezieht, sind in den Zeilen 10 bis 30 zu finden. An dieser Stelle wird ein Objektgraph serialisiert, da die Eigenschaft `Feature` hierarchisch untergliederbar ist. Danach folgen die Informationen zum beobachteten Merkmal `:phenomenonType`, zum Wert `:quantity` sowie zur Einheit `:units` der Messung.

Da die auf der FIPA-SL basierende Darstellung und der sich daraus ergebende JADE-interne Serialisierungsmechanismus hinsichtlich der Performanz nicht optimiert sind, musste eine skalierbare Lösung für die Übertragung der Messdaten implementiert werden, die die robuste Übertragung großer Datenmengen sicherstellt. Zu diesem Zweck wird das FIPA-Request-Interaktionsprotokoll so erweitert, dass die Messwerte in Paketen vorgegebener Länge (z.B. 500 Messwerte) übertragen werden. Dies erlaubt einerseits eine semantisch vollständige Darstellung und andererseits eine sehr gut skalierbare Übermittlung der Messdaten. Die hierzu erforderliche Logik wird in den oben bereits erwähnten Verhaltensbausteinen `DBIteratedStoreServerBehaviour` und `DBIteratedGetServerBehaviour` sowie `DBIteratedRemoveServerBehaviour` implementiert.

Die Archivierung der erfassten Messdaten wird ausserdem durch die Verwendung eines leistungsfähigen Datenbanksystems und die Entwicklung eines Datenbankschemas, das alle persistenten Elemente des Informationsmodell enthält, unterstützt (s. Unterabschn. 5.5.2). Der Abbildungsvorgang des intern verwendeten objektorientierten Datenmodells auf die relationale Struktur der Datenbank wird — aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Diplomarbeit [Bloch 04] — mittels eines objekt/relationalen Mapping-Frameworks implementiert. Zum Einsatz kommt das bewährte Framework Hibernate [Red Hat Middleware, LLC 09] (vgl. z.B. [Hartmann 06; Beer 09]).

5.5.2 Datenbankschema

Zur persistenten Speicherung der Messdaten in einem Datenbanksystem wird ein auf die entwickelte Bauwerksmonitoring-Ontologie[11] abgestimmtes Datenbankschema (s. Abb. 5.11) eingesetzt. Damit die Semantik der durchgeführten objektorientierten Informationsmodellierung bei der Abbildung auf die relationale Struktur des Datenbanksystems erhalten bleibt, werden die Java-Klassen mittels des Frameworks Hibernate in entsprechende Tabellen überführt. Das Mapping-Framework bildet hierbei eine Zwischenschicht zwischen Agent und Datenbank und ermöglicht (z.B. bei der Verteilung des Bauwerksmonitoringsystems auf eine bestehende

[11] vgl. Abschn. 5.8

IT-Infrastruktur) durch die zusätzliche Abstraktionsebene ggfs. einen einfachen Austausch des verwendeten Datenbanksystems.

Im Mittelpunkt des eingesetzten Datenbankschemas steht die Relation `Observation`, die eine Beobachtung abbildet. Informationen zur Beobachtung, wie das beobachtete Merkmal (`Feature`) oder der gemessene Wert (`Quantity`) werden in eigenen Tabellen gespeichert. Die hierarchische Untergliederung einzelner Konzepte in der Bauwerksmonitoring-Ontologie wird durch entsprechende Verknüpfungen zwischen den Tabellen des Datenbankschemas ebenfalls auf die Datenbank abgebildet (z.B. in den Tabellen `Feature` und `Feature_Superfeatures` oder `ObservationConcept` und `ObservationConcept_Superconcepts`).

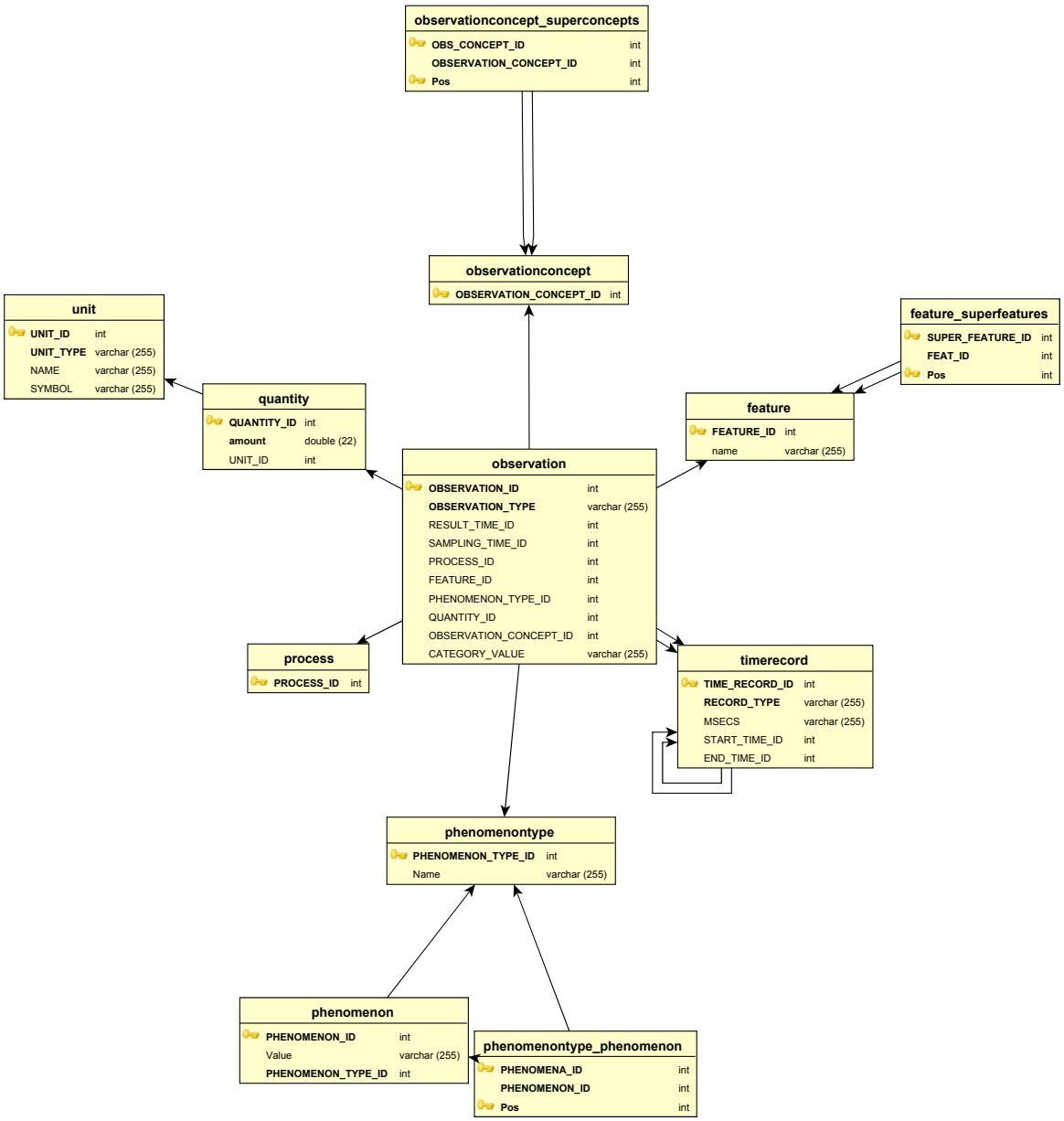


Abbildung 5.11: Datenbankschema zur persistenten Speicherung der Messdaten

5.6 Nutzung von Messdaten

Der letzte Schritt des in Kap. 4 formalisierten Monitoringablaufs, die Nutzung der erfassten Messdaten, wird im entwickelten Bauwerksmonitoringsystem auf mehreren Ebenen unterstützt. Im Vordergrund steht hierbei die Entscheidungsunterstützung der Monitoringbeteiligten. Deshalb werden mehrere Agententypen entwickelt, die bei der Verarbeitung und Auswertung der Messdaten behilflich sind und nachfolgend beschrieben werden.

5.6.1 Berichtsagent

Als ein geeignetes Mittel zur Entscheidungsunterstützung der Monitoringbeteiligten wurde die automatisierte Erstellung von Berichten (sog. Berichtswesen [Wikipedia 08, „Berichtswesen“] oder engl. reporting) erkannt. Die automatisiert erstellten Berichte erleichtern den Monitoringbeteiligten die Auswertung der Messdaten, da die Messdaten gezielt aufbereitet und in ansprechender optischer Form präsentiert werden. Die automatisierte Erstellung und Verteilung der Berichte obliegt dem Berichtsagenten, der prototypisch in der Klasse `ReportingAgent` implementiert wird (vgl. Abb. 5.12).

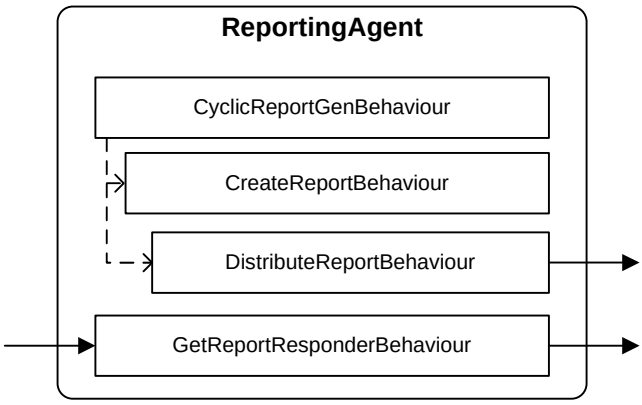


Abbildung 5.12: Verhaltensbausteine des Berichtsagenten

Die Erstellung der verschiedenartigen Berichte wird als ein generischer Prozess aufgefasst, der mehrere Teilschritten umfasst und in Abbildung 5.13 als UML-Aktivitätsdiagramm beschrieben wird. Der erste Schritt des Prozesses besteht im Laden einer Vorlage (Schablone) für den zu erstellenden Bericht. Die Schablone enthält allgemeine Angaben zum Aufbau des Berichts, zum Ausgabeformat als auch zu den Messdaten. Im zweiten Schritt „Daten laden“ werden die Messdaten aus der Datenquelle, z.B. aus einer Datenbank oder aus einer Datei, geladen. Danach werden die Messdaten den Vorgaben entsprechend aufbereitet und im abschließenden Schritt „Bericht exportieren“ in das gewünschte Ausgabeformat, z.B. PDF, gebracht.

Der beschriebene Prozess wird in den Verhaltensbausteinen `CyclicReportGenBehaviour`, `CreateReportBehaviour` und `DistributeReportBehaviour` des Berichtsagenten implementiert. Der Verhaltensbaustein `CyclicReportGenBehaviour` wird als periodisch ausgeführter Baustein ausgelegt, der die Berichtserstellung startet. Um die Erstellung optisch ansprechender Berichte zu vereinfachen, wird das Open-Source-Framework Jasper Reports [Jaspersoft Corporation 09] genutzt, das die Java-basierte Erstellung von Berichten sehr gut unterstützt. Die Berichtserzeugung findet im Verhaltensbaustein `CreateReportBehaviour` statt. Der Verhaltensbaustein `DistributeReportBehaviour` sorgt schließlich für eine Verteilung der Berichte. Die Verteilung kann dabei per Email oder über verschiedene Transport-

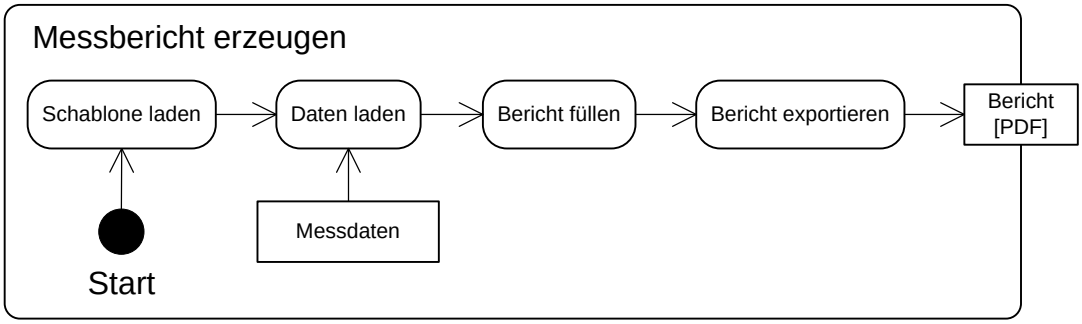


Abbildung 5.13: Einzelschritte zur Berichtserstellung (UML-Aktivitätsdiagramm)

protokolle (HTTP/S, FTP, etc.) erfolgen. Insbesondere die Verteilung per FTP bietet die Möglichkeit, die Berichte an zentraler Stelle verfügbar zu machen und so für die spätere Verwendung zu archivieren. Die Berichte können in verschiedene Zielformate (PDF, XML oder HTML) exportiert werden.

5.6.2 Filteragent

Zur Entscheidungsunterstützung der Fachexperten bei der Bewertung der Messdaten wird in der Klasse `DetectionAgent` ein spezialisierter Filteragent implementiert, dessen Verhaltensbausteine der Abb. 5.14 zu entnehmen sind.

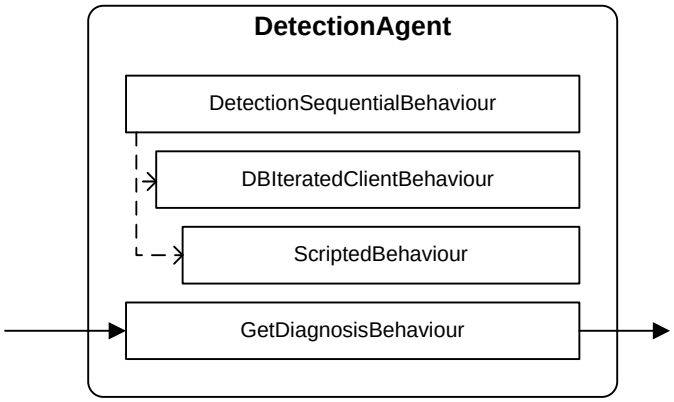


Abbildung 5.14: Verhaltensbausteine des Filteragenten

Zur automatisierten Bewertung der Messdaten wird der in Unterabschn. 4.4.4 beschriebene Ansatz aus [Salvaneschi 95] in den Agententypen integriert. Der Ansatz beruht auf einer Auswertung von Messdaten entlang mehrerer Auswertungspfade, die neben anderen die schwellenwertbasierte Beurteilung von Einzelmesswerten, die Bewertung von Messwerten auf der Basis von Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Messwerten, die phänomenologische Betrachtung (qualitative Analyse von Gruppen von Messwertaufnehmern des gleichen Typs) und die Prüfung der Messwerte auf kritische physikalische Prozesse (z.B. ein Kippen des Bauwerks) umfassen.

Die oben beschriebenen Auswertungspfade werden für die automatisierte Ausführung objektorientiert implementiert und in dem Baustein `ScriptedBehaviour` bereitgestellt. Die Fachlogik wird in Form eines Skriptes bereitgestellt, das zur Laufzeit des Bauwerksmonitoringsystems angepasst werden kann. Hierzu werden die Regeln in der Programmiersprache Groovy

[Codehaus 09] entwickelt, da Groovy skriptfähig ist und sehr gut in die primär verwendete Sprache Java integriert werden kann.

Alle Arbeitsschritte der Messdatenbewertung werden im sequentiellen Verhaltensbaustein `DetectionSequentialBehaviour` implementiert; dieser steuert die untergeordneten Bausteine `DBIteratedClientBehaviour` und `ScriptedBehaviour`, mit denen die erforderlichen Messdaten beschafft bzw. die Fachlogik zur Messdatenbewertung ausgeführt wird. Zustätzlich wird ein Verhaltensbaustein zur Beantwortung von Anfragen hinsichtlich des Bewertungsergebnisses in der Klasse `GetDiagnosisResponderBehaviour` implementiert.

5.6.3 Statistikagent

Zur Einbindung von Statistiksoftware wird der Statistikagent in der Klasse `StatisticsAgent` entwickelt. Dieser integriert prototypisch die freie Software R [R Development Core Team 09]. Die Kommunikation mit der externen Software wird dabei über den Verhaltensbaustein `RServerBehaviour` realisiert, der die Anfragen anderer Agenten entgegennimmt und diese an die Statistiksoftware überträgt (vgl. Abb. 5.15).

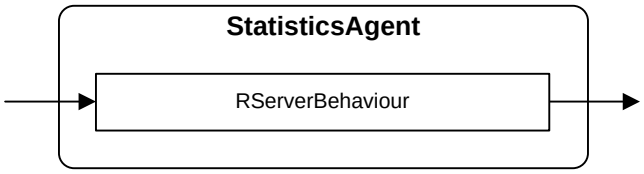


Abbildung 5.15: Verhaltensbausteine des Statistikagenten

Zur Integration der externen Software wird die Statistiksoftware R mittels des Paketes Rserve [Lehrstuhl für Rechnerorientierte Statistik und Datenanalyse 09] so erweitert, dass die Software im Server-Modus betrieben werden kann. Die Verbindung mit dem Server wird über eine TCP/IP-Schnittstelle im Baustein `RServerBehaviour` hergestellt, der die vom Agenten empfangene Anweisung in der Software ausführt. Beispielhaft ist in Listing 5.3 die Methode `executeCommandInR` des Statistikagenten dargestellt, in der die Kommunikation mit R realisiert wird.

Listing 5.3: Methode zur Kommunikation mit der Statistiksoftware R

```
1  /**
2   * This method talks with R.
3   *
4   * @param Rcommand the command sent to R
5   * @return the answer from R
6   */
7  private String executeCommandInR(String Rcommand)
8  {
9          String ret = null;
10         try {
11                 if (Rcommand.trim().length() == 0) {
12                         // do nothing - command is empty
13                         ret = "";
14                 } else {
15                         // Execute command in R
16                         REXP xp = c.parseAndEval(Rcommand);
17                         ret = xp.asString();
18                 }
```

```
19          } catch (RserveException rse) {
20                  // RserveException (transport layer -
21                  // e.g. Rserve is not running)
22                  logger.error(rse.getMessage());
23          } catch (REXPMismatchException mme) {
24                  // REXP mismatch exception (we got something
25                  // we didn't think we get)
26                  logger.error(mme.getMessage());
27          } catch (Exception e) {
28                  // something else
29                  logger.error("Unexpected error: " + e.getMessage());
30          }
31          return ret;
32  }
```

Um die visuelle Auswertung von Messdaten effektiv zu unterstützen, wird der Verhaltensbaustein `RServerBehaviour` so ergänzt, dass auch das Versenden von Grafiken möglich ist. Grafiken können somit — durch die Eingabe entsprechender Anweisungen in der grafischen Benutzungsschnittstelle des persönlichen Agenten — lokal erstellt und betrachtet werden.

Die Grafik wird dazu vom Benutzer über den persönlichen Agenten angefordert, auf dem Server berechnet und als Inhalt einer Agentennachricht vom Statistikagenten zum persönlichen Agenten transportiert. Auf der Seite des persönlichen Agenten wird die Grafik dann entpackt und in einem Dokumentfenster angezeigt.

Das folgende Kap. 6 enthält mehrere Beispiele, in denen die beschriebene Eigenschaft genutzt wird, um Grafiken zu erzeugen.

5.6.4 Persönlicher Agent

Für die verschiedenen Fachexperten werden so genannte persönliche Agenten entwickelt, die abhängig von der Zuständigkeit des Experten konfiguriert sind. Die persönlichen Agenten bilden die Schnittstelle zwischen Multiagentensystem und den Fachexperten und enthalten mehrere Verhaltensbausteine, die die Interaktion mit anderen Agententypen realisieren (vgl. Abb. 5.16).

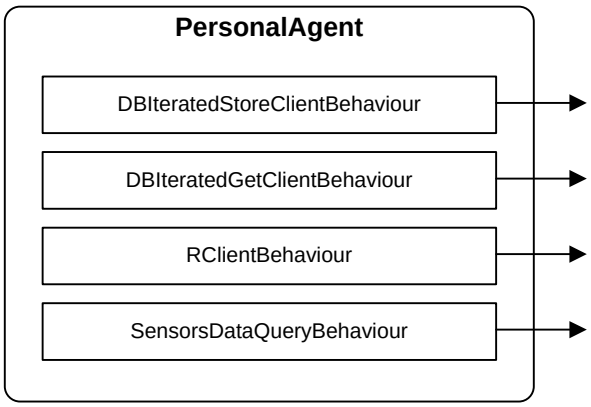


Abbildung 5.16: Verhaltensbausteine des persönlichen Agenten

Die überwiegende Zahl der Interaktionen des persönlichen Agenten dienen der Interaktion mit anderen Agententypen: die Interaktion mit den Datenspeicherungsagenten wird in

den Bausteinen `DBIteratedGetClientBehaviour` und `DBIteratedStoreClientBehaviour` zusammengefasst, während Interaktionen mit dem Statistikagenten und dem Sensorikagenten in den Bausteinen `RClientBehaviour` und `SensorsDataQueryBehaviour` implementiert werden.

Zur visuellen Darstellung aller relevanten Informationen, insbesondere der aktuellen Bewertung der Messdaten, wird eine grafische Benutzungsschnittstelle implementiert. Durch diese wird den Beteiligten ein schneller Überblick über das gesamte Bauwerk, seinen aktuellen Zustand, die Bewertung des aktuellen Zustands und die Prognose von evtl. auftretenden Ereignissen ermöglicht. Darüber hinaus ist es möglich, über die von den verschiedenen Agententypen im MAS angebotenen Dienste, die Nutzung der externen Software (insbesondere Statistiksoftware), sowie den Zugriff auf die Datenbanken jederzeit alle für das Monitoring relevanten Informationen anzufordern.

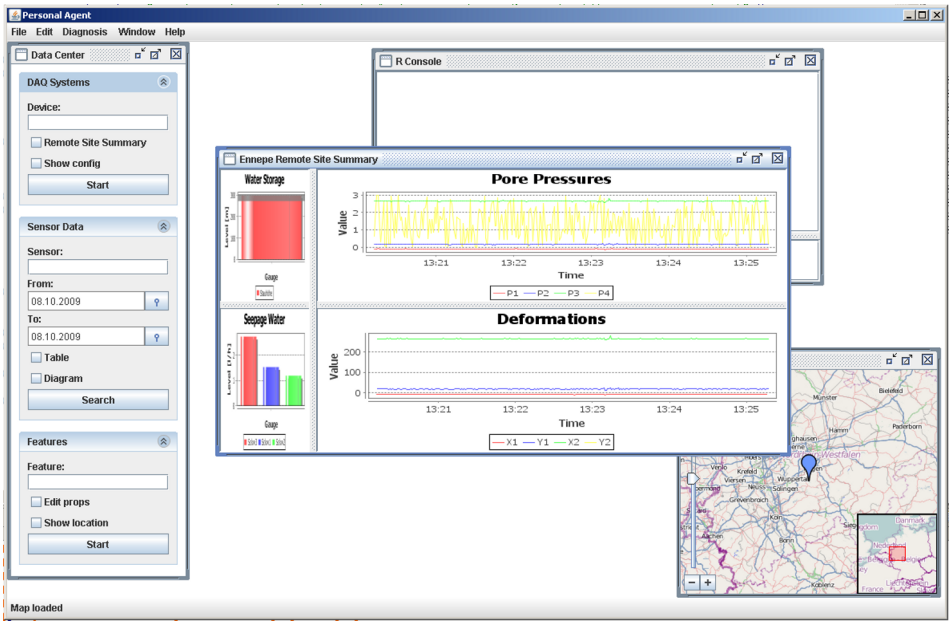


Abbildung 5.17: Grafische Benutzungsschnittstelle des persönlichen Agenten mit mehreren geöffneten Dokumentfenstern

Die Implementierung der grafischen Benutzungsschnittstelle erfolgt in der Klasse `DesktopFrame`. Um den Fachexperten einen einfachen Zugriff auf die verschiedenen Systemfunktionalitäten zu ermöglichen und das parallele Bearbeiten mehrerer Aufgaben zu unterstützen, wird die Benutzungsschnittstelle als Mehrfachdokumentschnittstelle (engl.: Multiple Document Interface, MDI) umgesetzt. Im Hauptfenster der GUI können gleichzeitig mehrere Dokumente, wie Messreihen, Diagramme, Konsolen, etc., geöffnet werden, die in separaten Unterfenstern/internen Rahmen angezeigt werden. Die Hauptelemente der grafischen Benutzungsschnittstelle sind eine Dialogkomponente für die Auswahl der Messdaten und Messgeräte und eine Konsole zur Durchführung der statistischen Auswertungen.

Die grafische Benutzungsschnittstelle des persönlichen Agenten mit mehreren Unterfenstern zur Messdatenauswahl, zur Durchführung statistischer Auswertungen sowie zur Ansicht von aktuellen Messwerten ist in Abb. 5.17 dargestellt.

5.7 Selbstdiagnose/Selbstüberwachung

5.7.1 Systemüberwachungsagent

Grundlegende Fähigkeiten zur Überwachung des Bauwerksmonitoringsystems werden in der Klasse `SystemObserverAgent` implementiert (s. Abb. 5.18). Gemäß dem in Unterabschn. 4.4.5 entwickelten Konzept wird der Agent für die Nutzung der durch die Agentenplattform bereitgestellten Verwaltungsdienste ausgelegt, um die Monitoringbeteiligten auf der Basis dieser Informationen über den aktuellen Systemzustand, insbesondere den unerwarteten Ausfall von Agenten zu informieren.

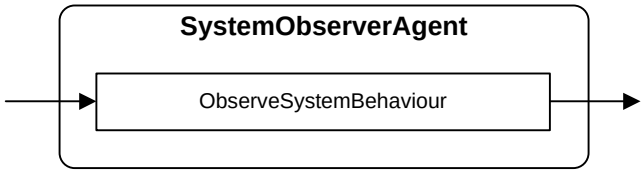


Abbildung 5.18: Verhaltensbausteine des Systemüberwachungsagenten

Hierzu wird ein Verhaltensbaustein `ObserveSystemBehaviour` implementiert, der sich beim AMS registriert und auf wichtige Plattformereignisse wartet. Die Interaktion mit dem AMS wird mithilfe der Klasse `AMSSubscriber` implementiert, die als vorgefertigter Verhaltensbaustein den Nachrichtenversand/-empfang wesentlich vereinfacht, indem die Registrierung entsprechender EventHandler-Klassen beim AMS unterstützt wird. Beispielhaft ist in Listing 5.4 die Implementierung und Registrierung eines EventHandlers für das Ereignis `dead-agent` dargestellt.

Listing 5.4: Interaktion mit dem AMS mittels des vorgefertigen Verhaltensbausteins AMSSubscriber

```
1  AMSSubscriber as = new AMSSubscriber() {
2      protected void installHandlers(Map handlers) {
3          EventHandler terminationsHandler = new EventHandler() {
4              public void handle(Event ev) {
5                  DeadAgent da = (DeadAgent) ev;
6                   logger.warn("Agent " + da.getAgent().getName() +
7                       " died.");
8                   // inform registered agents about event
9                   // ...
10                  // ...
11             }
12         };
13         handlers.put(IntrospectionVocabulary.DEADAGENT,
14             terminationsHandler);
15     }
16 };
```

5.8 Bauwerksmonitoring-Ontologie

Alle Agenten des Bauwerksmonitoringsystems werden mit grundlegendem Wissen über die wichtigsten Begriffe und Konzepte der Domäne „Bauwerksmonitoring“ und ihre Zusammenhänge ausgestattet. Dieses Wissen wird den Agenten in Form einer Ontologie bereit-

gestellt. Die entwickelte Ontologie für das Bauwerksmonitoring umfasst eine formale Beschreibung der zur gemeinsamen Problemlösung benötigten Begriffe (ca. 30 Elemente (Begriffe, Prädikate und Aktionen), die aus dem in Abschnitt 4.6 entwickelten Modell abgeleitet sind), um den Agenten ein hinreichend umfassendes Verständnis über die wichtigsten Begriffe zu vermitteln. Für eine Kompatibilität mit bestehenden Ontologien (z.B. SWEET[12] [Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology 09]), werden — wann immer möglich — bereits vereinbarte Begriffe integriert.

Die Definition der Ontologie erfolgt in der Klasse `MonitoringOntology`, wobei die Ontologieelemente in jeweils eigenen Klassen abgebildet werden. Hauptelemente der Bauwerksmonitoring-Ontologie sind:

- Observation: Abstraktes Basiskonzept für alle Beobachtungen und Messungen.
- CategoryObservation: Konzept zur Abbildung von qualitativen Beobachtungen. Qualitative Beobachtungen liefern eine Kategorie als Ergebnis, die über das Konzept Phenomenon abgebildet wird.
- Measurement: Konzept zur Abbildung von Messwerten. Ein Messwert ist eine Beobachtung, die eine Quantität als Ergebnis liefert. Ein Messwert ist hierzu mit der beobachteten Eigenschaft, der Quantität und der Einheit der Messung verknüpft.
- Feature: Bildet ein beobachtete Eigenschaft auf generische Weise ab. Eine Eigenschaft kann z.B. ein Bauwerk, ein Bauwerksbereich oder eine Messstelle sein. Zur Abbildung komplexer Eigenschaften kann ein Feature hierarchisch untergegliedert werden.
- PhenomenonType: Konzept, das die Art eines Phänomenen bzw. eine physikalische Eigenschaft abbildet.
- Phenomenon: Bildet das Ergebnis einer qualitativen Beobachtung ab. Das Ergebnis ist eine Kategorie. In Verbindung mit einer Eigenschaften können Aussagen wie „starke Abplatzung“ oder „hoher Wasserstand“ abgebildet werden.
- Unit: Konzept zur Abbildung von Einheiten. Die Aufnahme von Einheiten in die Ontologie erlaubt u.a. die Umwandlung von Messwerten.
- Process: Konzept zur Abbildung von Messeinrichtungen sowie Mess- und Beobachtungsvorgängen. Die Beschreibung von Messeinrichtungen erfolgt in SensorML, wobei das Konzept primär als Container für SensorML-Dokumente bzw. -Fragmente dient.
- Get-Observations: Agentenaktion für das Holen von Messwerten und Beobachtungen. Die Aktion enthält Suchkriterien für Messdaten, die vom verantwortlichen Agententypen, dem Datenspeicherungsagenten, ausgewertet werden. Weitere Aktionen werden für das Speichern, Aktualisieren und Löschen von Messwerten implementiert.
- Get-Data: Agentenaktion für das Holen von Rohdaten aus einem Datenlogger bzw. aus einer Messdatei.
- Describe-Sensor: Agentenaktion für die Zusendung von Informationen über ein Datenerfassungssystem bzw. einen Sensor.

Abbildung 5.19 zeigt einen Auszug der entwickelten Bauwerksmonitoring-Ontologie. Die technische Umsetzung der Ontologie erfolgte vollständig im Ontologie-Editor Protégé

[12] engl.: Semantic Web for Earth and Environmental Terminology. Sammlung mehrerer Ontologien der NASA, die Begriffe zur Erd- und Umweltbeobachtung definieren.

[Stanford Center for Biomedical Informatics Research 08], wobei aus den modellierten Konzepten, Prädikaten, usw. mittels des Beanynizer-Plugins [Braubach 05] Klassen für das Javabasierte Ontologiemodell (vgl. Unterabschn. 3.3.5) der verwendeten Agentenplattform JADE generiert wurden.

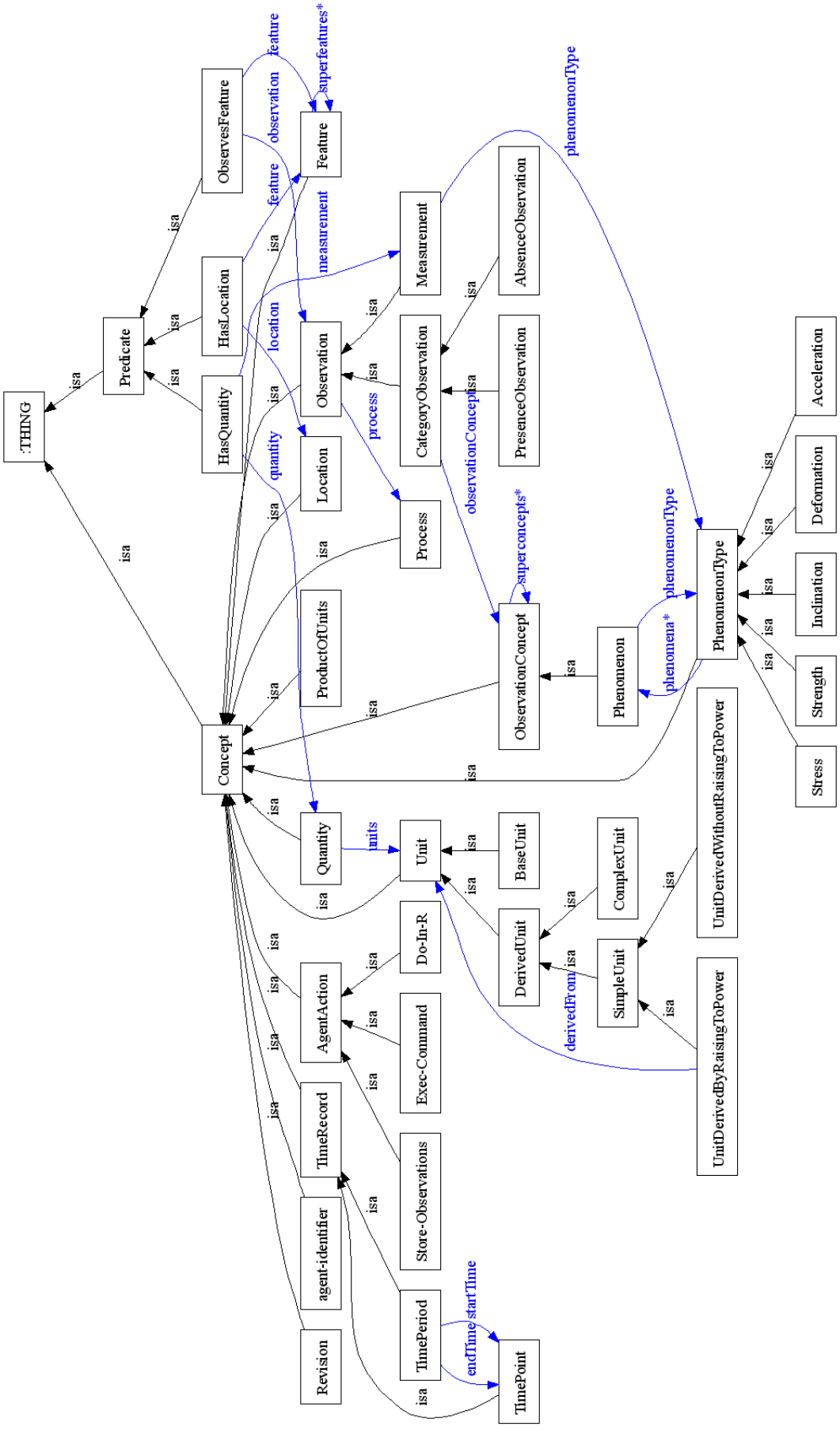


Abbildung 5.19: Entwickelte Bauwerksmonitoring-Ontologie

5.9 Verteilungskonzept für die Praxis

Die oben beschriebene Grobarchitektur des Bauwerksmonitoringsystems wird durch ein exemplarisches Verteilungskonzept für die Systemkomponenten verfeinert (wie im Folgenden beschrieben): Das Bauwerksmonitoringsystem wird auf die Knoten[13] (i) Messrechner, (ii) Betriebsstelle, (iii) Fremdsystem, (iv) Zentrale sowie (v) Archivierung und Analyse verteilt (s. Abb. 5.20).

Die Ressource Sensorik wird im Verteilungskonzept durch den Knoten *Messrechner* repräsentiert, der mit den Datenerfassungssystemen im/am Bauwerk verbunden ist und auf dem die Messdaten in Rohdatenform abgelegt werden. Auf diesen Knoten werden die Agententypen Sensorikagent und Messdateiagent verteilt, um den Zugriff auf die Datenerfassungssysteme bzw. Messdateien zu ermöglichen.

Der Knoten *Betriebsstelle* bildet den Rechner ab, auf dem ein relationales Datenbanksystem (DBS) zur strukturierten Speicherung der Messdaten installiert ist und auf dem die Messberichte abgelegt werden, die von den menschlichen Monitoringbeteiligten erzeugt werden, z.B. nach manuell durchgeführten Messungen. Zur Kapselung des Datenbanksystems ist auf diesem Knoten ein Datenspeicherungsagent vorzusehen.

Externe Systeme, die für das Bauwerksmonitoring relevante Daten liefern, werden stellvertretend durch den Knoten *Fremdsysteme* abgebildet. Im Fall der Talsperrenüberwachung z.B. werden wichtige Daten, wie Pegelstände und Abflüsse, aus einem externen wasserwirtschaftlichen System bezogen, das die Daten in Form von CSV-Dateien bereitstellt. Die Messdaten werden durch einen Messdateiagenten verfügbar gemacht, der entweder lokal (auf dem Knoten Fremdsystem) oder auf dem zentralen Knoten platziert werden kann.

Der Knoten *Zentrale* umfasst alle Rechner innerhalb eines zentralen Netzwerkes, das die Arbeitsplatzrechner der Monitoringbeteiligten umfasst. Der Knoten nimmt als zentrale Instanz die Datenverteilungs-, Datenverarbeitungs- und Datenspeicherungsagenten des Bauwerksmonitoringsystems auf.

Daneben wird ein Knoten *Archivierung und Analyse* vorgesehen, der die Systemressourcen Analyse und Datenspeicherung aufnimmt. Auf diesen Rechnern werden die genutzten Datenbanksysteme sowie die Statistik- und Berichtssoftware installiert. Die Einführung dieses Knotens soll die Verteilung der Systemteile auf besonders leistungsfähige Rechner (z.B. Clusterrechner) ermöglichen.

Die Kommunikation zwischen den Agententypen erfolgt über deren Kommunikationsschnittstellen. Als bevorzugte Kommunikationssprache wird dabei FIPA-ACL verwendet (vgl. Abb. 5.20). Zusätzliche Schnittstellen sind bei der Verteilung des Bauwerksmonitoringsystems auch für die eingesetzten Datenbanksysteme vorzusehen.

[13] Es ist zu beachten, dass ein Knoten aus einem oder mehreren Rechnern bestehen kann.

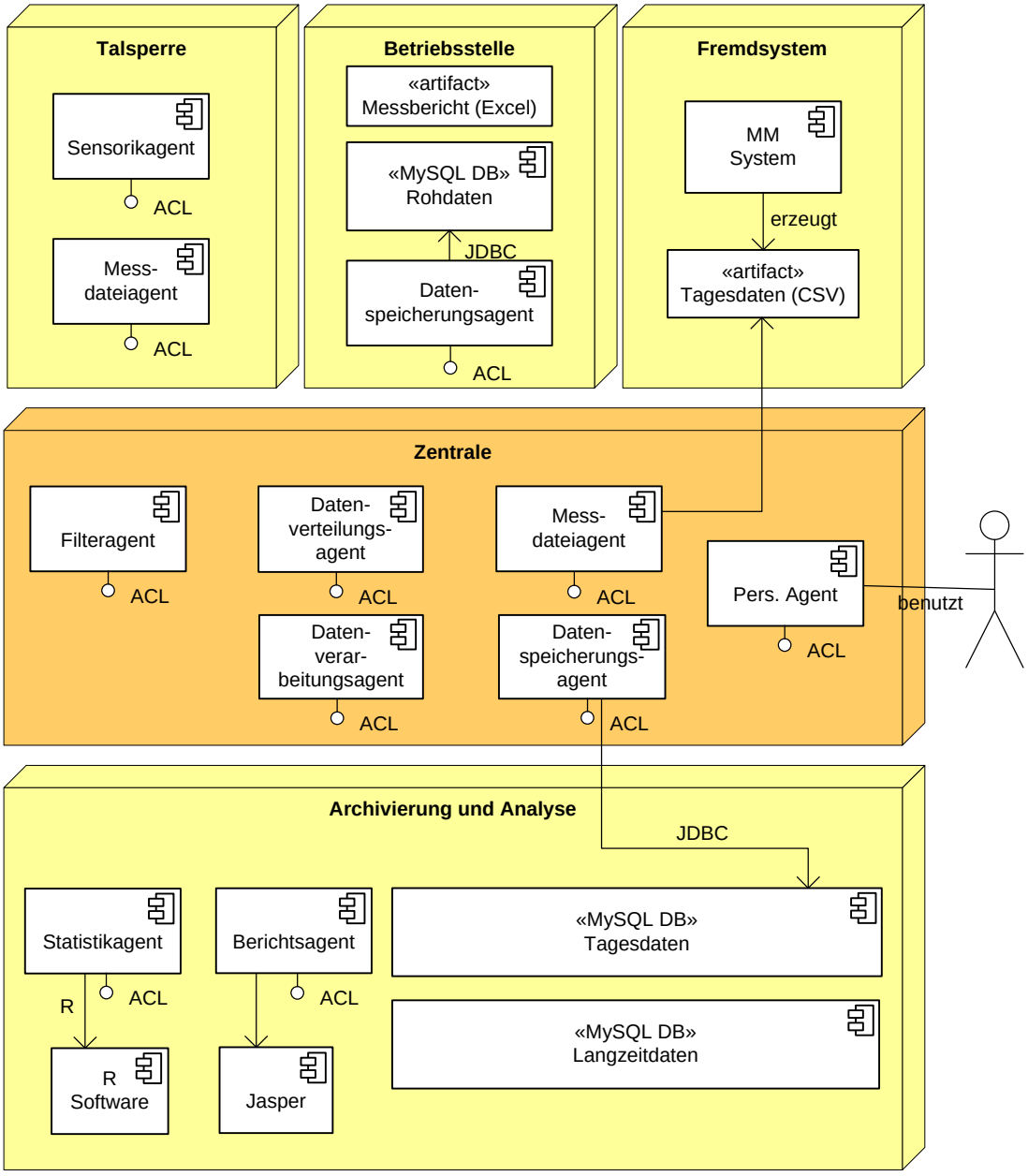


Abbildung 5.20: Detailarchitektur und Verteilung der Komponenten des Bauwerksmonitoringsystems RAMON (UML-Verteilungsdiagramm)

Kapitel 6

Validierung am Beispiel der Talsperrenüberwachung

*Die Funktionalitäten des entwickelten Bauwerksmonitoringsystems **RAMON** werden anhand mehrerer Anwendungsfälle validiert. Hierzu wird das Monitoringsystem auf ein fiktives, praxisbezogenes Szenario aus der Talsperrenüberwachung angewendet, in dem die Ennepetalsperre als Referenzsystem dient. Es wird gezeigt, wie das Monitoringsystem die Fachingenieure bei der Kontrolle und der Überwachung des Bauwerkszustandes effektiv unterstützt. Zur Validierung werden synthetische Daten verwendet, die auf real gemessenen Daten aus der automatisierten Datenerfassung der Ennepetalsperre basieren.*

6.1 Talsperrenüberwachung

Talsperren sind sicherheitskritische Bauwerke, die im Versagensfall durch die Lageenergie des eingestauten Wassers ein erhebliches Gefährdungspotential für die Bevölkerung in der Umgebung besitzen. Aus diesem Grund zählen Talsperren zu den wenigen Bauwerken, die schon seit langem mit Einrichtungen zur Messung der relevanten Messgrößen ausgestattet sind. Als Folge ist die Verbesserung der Mess- und Auswertungsverfahren (vgl. z.B. in [De Sortis 07]) ein Forschungsschwerpunkt auf dem Gebiet der Talsperrenüberwachung. Das Ziel ist es, das durch manuelle oder automatisierte Messungen am Bauwerk beobachtete Bauwerksverhalten zeitnah und zuverlässig beurteilen zu können, um daraus eine Gesamtdiagnose des Bauwerks stellen zu können. Im Hinblick auf den globalen Klimawandel und die Hochwasserschutzfunktion der Talsperren sind aber auch Extremereignisse (z.B. extremes Hochwasser) mit entsprechenden Einwirkungen auf das Bauwerk von zunehmendem Interesse (vgl. z.B. [Deutsches Talsperrrenkomitee e.V. 07]).

6.1.1 Analyse- und Prognosemodelle für Staumauern

Die Untersuchung des Bauwerksverhaltens anhand der Messschriebe kann wichtige Indizien für kritische Bauwerksveränderungen liefern. Als Folge beschäftigen sich die aktuellen Forschungsarbeiten zur Talsperrenüberwachung überwiegend mit der Verbesserung von Verfahren zur Analyse und Simulation des Bauwerksverhaltens unter Berücksichtigung der durch das Mess- und Kontrollsystem erfassten Einwirkungen auf das Bauwerk. Aufbauend auf [Horlacher 02] werden die Ansätze zur computerbasierten Analyse und Prognose des Ver-

haltens von Staumauern im Hinblick auf die Anwendbarkeit in Bauwerksmonitoringsystemen evaluiert. Die Ansätze lassen sich in folgende Gruppen einordnen:

- mathematisch-statistische Verfahren (z.B. Regressionsanalyse),
- Verfahren mit parametrisierten Funktionsansätzen (z.B. HST-Methode),
- rein deterministische Verfahren wie z.B. Finite-Element-Simulationen,
- hybride und gekoppelte Verfahren [Horlacher 02].

Die *mathematisch-statistischen Verfahren* versuchen, vorliegende Messdaten in geeigneter Weise zu beschreiben und inhärente Abhängigkeiten durch statistische Auswertung zu quantifizieren. Besondere Bedeutung für die Anwendung in der Talsperrenüberwachung besitzen dabei die Zeitreihen- und die Regressionsanalyse [Bettzieche 02]. Ein interessanter Ansatz stammt z.B. von Böcker et al. [Böcker 05], die statistische Verfahren zur Trend- und Sprungerkennung auf die Messdaten aus der Talsperrenüberwachung anwendeten, um signifikante Veränderungen in Messreihen automatisiert zu erkennen. Besonders vorteilhaft ist, dass der Ansatz nicht nur auf die Verformungsmessungen, sondern auf andere Messreihen aus der Talsperrenüberwachung anwendbar ist.

Die *Verfahren mit parametrisierten Funktionsansätzen* berücksichtigen die bekannten Einflüsse auf das Verhalten einer Staumauer — Wasserdruck, Temperatur und Zeit — durch entsprechende Funktionsansätze und bestimmen die Koeffizienten des Funktionsansatzes mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Erste Verfahren, darunter die HST-Methode (engl.: Hydrostatic, Seaon, Time)[Ferry 58; Willm 67], wurden bereits in den 1960er Jahren entwickelt. Gleichung 6.1 zeigt den Funktionsansatz der HST-Methode:

$$M = H(z) + S(s) + T(t) + C + R \tag{6.1}$$

mit M = Prognosewert (radiale Verformung)
$S(s)$ = Einfluss des Wasserdrucks als Polynom maximal 4. Grades der Stauhöhe
$T(t)$ = saisonaler Einfluss als Summe bis zu vier trigonometrischer Funktionen
C = Konstante
R = Residuen

Bis heute ist die HST-Methode in vielen Ländern das dominierende Verfahren, um die Verformungsmessungen aus der Talsperrenüberwachung zu analysieren [Chouinard 06; Garabedian 06]. Die Methode wird stetig verfeinert, um die Prognosegenauigkeit zu steigern. Ein neuerer Ansatz wurde z.B. von Horlacher et al. in [Horlacher 02] vorgestellt. Darin wird ein real gemessener Temperaturverlauf über die Gleitmittelwerte der Lufttemperatur in das Modell aufgenommen, um den saisonalen Einfluss auf das Bauwerksverhalten genauer zu beschreiben:

$$TP(\theta, t) = a_{TP11} \cdot \overline{\theta_{t,n1}} + a_{TP12} \cdot \overline{\theta_{t,n1}} \cdot |\overline{\theta_{t,n1}}| + a_{TP21} \cdot \overline{\theta_{t,n2}} + a_{TP22} \cdot \overline{\theta_{t,n2}} \cdot |\overline{\theta_{t,n2}}| \tag{6.2}$$

mit $\overline{\theta_{t,n}}$ = Gleitmittelwert der Lufttemperatur über n von Datum t zurückliegende Tage

Die Gleitmittelwerte können dabei entsprechend variiert werden (z.B. n1 = 5 Tage und n2 = 30 Tage), um das Modell an beobachtete Temperaturverläufe anzupassen.

Die *deterministischen Verfahren* beschreiben das Bauwerksverhalten ausschließlich auf der Basis deterministisch angenommener, physikalischer Zusammenhänge; hierbei werden keine beobachteten Daten zur Modellbildung herangezogen. Ein Vorteil der deterministischen Verfahren ist, dass die rein determistischen Verfahren auch eine Betrachtung von Extremsituationen erlauben. Zur Diskretisierung der betrachteten Struktur wird überwiegend die Finite Element-Methode eingesetzt. Ein alternativer Ansatz zur deterministischen Modellierung stammt von Cherubim, der auf der Basis eines 2-Stab-Modells die temperaturbedingten Verformungen der Mauerkrone berechnet [Cherubim 05]. Die thermisch aktive Zone des Mauerkörpers wird dabei durch zwei Pendelstäbe entlang der Luft- und Wasserseite der Staumauer modelliert, die am oberen Ende (Mauerkopf) gelenkig verbunden sind. Den Stäben werden abschnittsweise die real gemessenen Temperaturen des nächstliegenden Messgebers zugeordnet und auf der Basis der Wärmeausdehnungsgleichung die Längenänderungen der Pendelstäbe berechnet, die als Bewegung der Mauerkrone interpretiert werden können.

Die *hybriden bzw. gekoppelten Verfahren* basieren auf einer Kombination von statistischen und deterministischen Verfahren. In einen deterministischen Ansatz werden dabei Koeffizienten eingeführt, die auf der Basis von Messdaten ermittelt bzw. kalibriert wurden. Gekoppelte Verfahren bilden beispielsweise häufig den Einfluss des Wasserdrucks auf das Verhalten der Staumauer mithilfe eines deterministischen Modells (FE-Modell) ab. Das schwer zu beschreibende, instationäre Temperaturfeld der Staumauer wird dagegen vereinfachend durch einen statistischen Ansatz auf der Basis gemessener Lufttemperaturen erfasst [Horlacher 02].

Neuere Ansätze betrachten die Analyse des Bauwerksverhaltens als ein Problem der Systemidentifikation. Das gemessene Verhalten eines Staubauwerks wird hierzu dem simulierten Verhalten gegenübergestellt und die Abweichung zwischen Messung und Simulation minimiert (Bauwerksparameter, physikalische Eigenschaften, Materialeigenschaften). Das Ziel ist es hierbei, Schädigungen anhand der physikalischen Eigenschaften zu detektieren und zu lokalisieren. Maier [Ardito 05] teilt das Bauwerk hierzu in mehrere Bereiche ein, denen jeweils ein E-Modul zugewiesen wird. Mittels einer Radar-Messung werden dann die Verformungen der Staumauer an einer Vielzahl von Punkten ermittelt und mit den simulierten Verformungen verglichen. Bei der inversen Anpassung des Simulationsmodells an die gemessenen Werte liefert die Berechnung eine Verringerung des E-Moduls, die als Vorhandensein eines Schadens interpretiert werden kann.

Einen weiterführenden Überblick über aktuelle Forschungsaktivitäten geben die Veröffentlichungen des von 2002 bis 2005 durchgeführten europäischen Projekts „Integrity Assessment of Large Concrete Dams“ (IALAD) [NW-IALAD 05], insbesondere des Arbeitspakets 3 „Dam performance under normal and extraordinary load conditions“ und die Konferenzen des ICOLD (engl. International Comittee on Large Dams) [Berga 06].

6.1.2 Talsperrenüberwachung nach DIN 19700

Die Talsperrenüberwachung beruht in der Praxis — im Gegensatz zur rein inspektionsbasierten Überwachung anderer Bauwerkstypen — auf zwei wesentlichen Methoden: einer qualitativen Überwachung der Bauwerke auf der Basis visueller Kontrollen und einer systematischen messtechnischen Erfassung aller Daten, die die Sicherheit der Talsperre betreffen. Jedes Absperrbauwerk einer Talsperre, d.h. einer Staumauer oder eines Staudamms, ist deshalb mit einem Mess- und Kontrollsystem ausgestattet, das der Art, der Größe und der Lage des Bauwerks angepasst ist [Hepp 98].

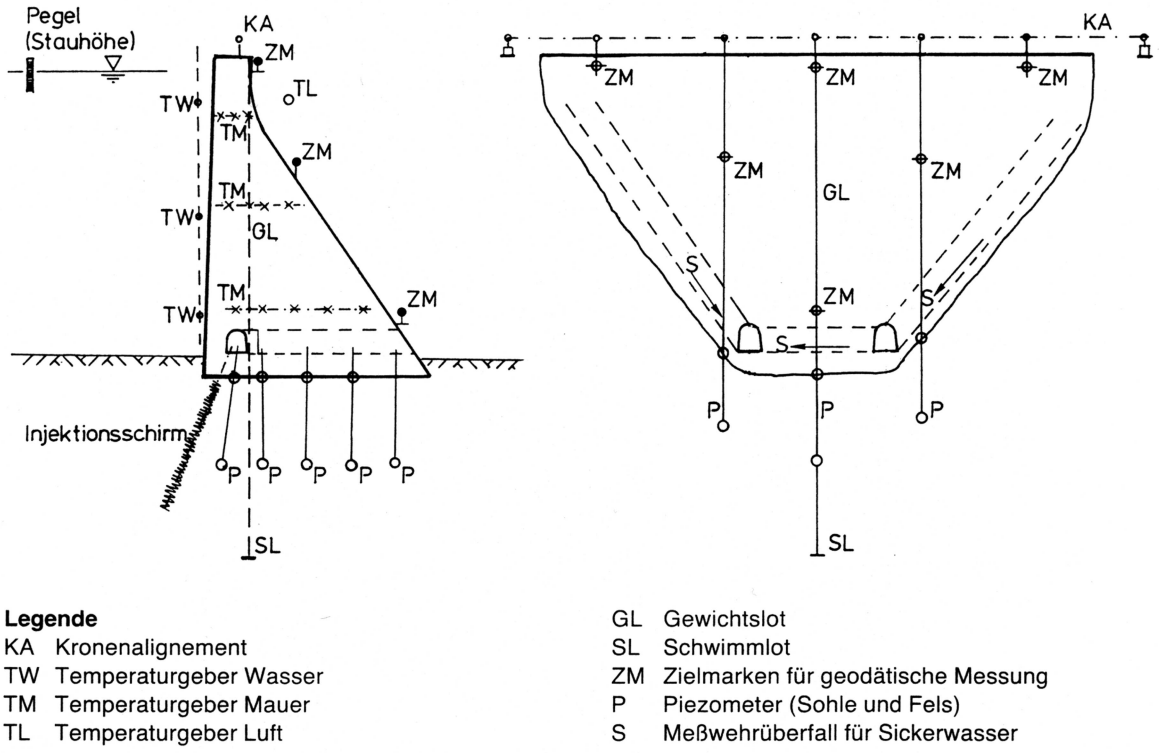
In Deutschland wird die Überwachung von Staubauwerken durch die DIN 19700 (2004) „Stauanlagen“ [DIN 19700 04] und das DVWK-Merkblatt 222 (1991) „Mess- und Kontrol-

leinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen“ [DVWK-Merkblatt 222 91] festgelegt. Während sich die DIN 19700 mit allen Aspekten von Stauanlagen vom Entwurf, über die Bemessung und Überwachung bis hin zum Betrieb befasst, gibt das DVWK-Merkblatt detaillierte Empfehlungen für die Zustandsüberwachung und -kontrolle von Talsperren. Nach DVWK-Merkblatt 222 sollten die folgenden Messgrößen im Rahmen von regelmäßigen Bauwerkskontrollen und einer fortlaufenden Zustandserfassung überwacht werden:

- Verschiebungen
- Differenzbewegungen an den Blockfugen (nur bei Gewichtsstaumauern)
- Stauhöhe
- Sickerwasser
- Sohlenwasserdruck
- Temperaturen
- Beschleunigung (nur in Erdbebengebieten)
- Niederschlag

Zur Messsung dieser Größen werden Talsperren üblicherweise mit einem Mess- und Kontrollsystem ausgestattet. Die Ausstattung der Talsperren mit Mess- und Kontrolleinrichtungen orientiert sich dabei vorwiegend am DVWK-Merkblatt 222. Das Merkblatt enthält z.B. eine Empfehlung zur Regelausstattung und zum Messprogramm für Gewichtsstaumauern unterschiedlicher Größen: Es werden insbesondere Empfehlungen zur Anordnung von Messstellen als auch zur Messhäufigkeit gegeben, die in Abhängigkeit von der Messgröße zwischen einem täglichen (Stauhöhe, Lufttemperatur und Niederschlag) und einem halbjährlichen Messintervall (Verschiebungen bzw. Blockbewegungen) variiert.

Die Messstellen sind i. Allg. in mehreren Messlinien bzw. -querschnitten angeordnet, um einzelne Abschnitte eines Bauwerks gezielt überwachen zu können. Eine für Schwergewichtsmauern (Höhe < 60 m) empfohlene Anordnung von Messstellen ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Die Anordnung der Messstellen in Messquerschnitten ermöglicht die Ermittlung des räumlichen Verlaufs von Messgrößen und der Verschiebung der Staumauer gegenüber dem Untergrund. Diese Messgrößen sind z.B. beim Standsicherheitsnachweis von Staumauern oder der Simulation des Bauwerksverhaltens von Bedeutung. Im Rahmen der Überwachung werden nicht nur die Staumauer selbst, sondern auch die nähere Umgebung des Bauwerks wie z.B. die Talflanken und Untergrund beobachtet.



Legende

KA	Kronenalignement
TW	Temperaturgeber Wasser
TM	Temperaturgeber Mauer
TL	Temperaturgeber Luft
GL	Gewichtslot
SL	Schwimmlot
ZM	Zielmarken für geodätische Messung
P	Piezometer (Sohle und Fels)
S	Meßwehrüberfall für Sickerwasser

Abbildung 6.1: Anordnung von Mess- und Kontrolleinrichtungen nach DVWK [DVWK-Merkblatt 222 91]

6.2 Überwachungsszenario

6.2.1 Referenzsystem Ennepetalsperre

Als Referenzsystem innerhalb des Überwachungsszenarios dient die Ennepetalsperre, eine in den Jahren 1904 bis 1906 erbaute Talsperre in der Nähe Schwelms. Die Ennepetalsperre wurde nach dem Intze-Prinzip erbaut und hat einen Stauinhalt von 12,6 Mio. m^3. Das Absperrbauwerk ist eine 320 m lange, 51 m hohe und an der Sohle 36 m breite Gewichtsstaumauer aus Bruchsteinen. Heute wird die Talsperre vorwiegend zur Trinkwasserversorgung des Ennepe-Ruhr-Kreises und zur Hochwasserregulierung im Einzugsgebiet der Ruhr genutzt.

Abbildung 6.2: Staumauer der Ennepetalsperre (Quelle: Ruhrverband)

Die Ennepetalsperre wurde ab 1996 an die allgemein anerkannten Regeln der Technik angepasst [Rißler 99]. Im Rahmen einer Überprüfung der alten Gewichtsstaumauern in Nordrhein-Westfalen war festgestellt worden, dass viele Talsperren, darunter auch die Ennepetalsperre, ohne den Ansatz von Poren- und Sohlwasserdrücken entworfen und berechnet worden waren, sodass sie nach neueren physikalischen und ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen nicht hinreichend standsicher erschienen. Das Ziel des Anpassungs- und Sanierungskonzeptes war es, eine ausreichende Standsicherheit der Mauer zu gewährleisten und das zwischenzeitlich abgesenkte Stauziel wieder zu erreichen. Den Kern der Anpassungs- und Sanierungsmaßnahmen bildeten das Auffahren eines Drainagestollens, die Abdichtung der Mauer und des Untergrundes durch Injektionen aus dem Drainagestollen heraus und die Entspannung der Porenwasserdrücke in Mauer und Untergrund durch vom Drainagestollen aus fächerförmig angeordnete Drainagebohrungen [Rißler 99].

Da es zum damaligen Zeitpunkt keine ausreichenden Erfahrungswerte zur Anordnung (insbesondere zum Abstand) der Drainagefächer gab, wurde in der Talmitte der Ennepetalsperre

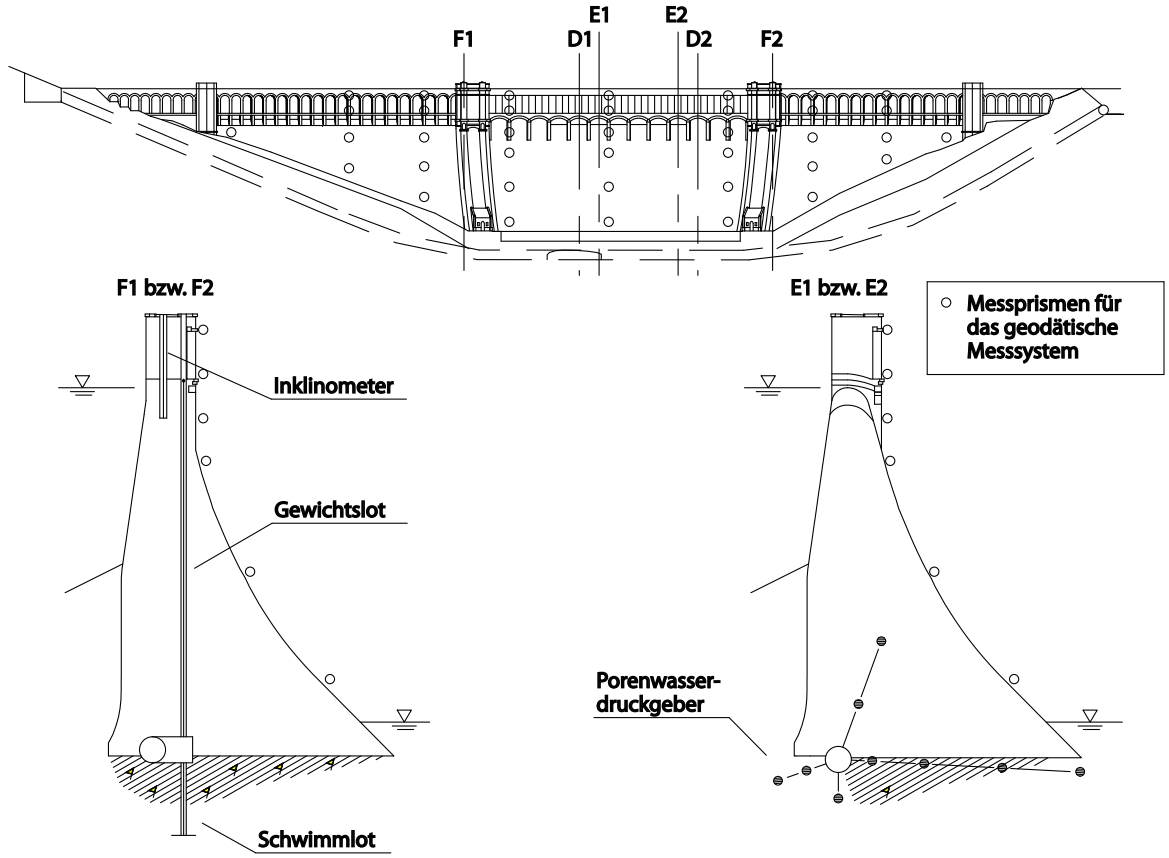


Abbildung 6.3: Messquerschnitte der Ennepetalsperre und Lage der Messeinrichtungen (Quelle: Ruhrverband)

ein 40 m breites Mess- und Versuchsfeld mit zahlreichen Messeinrichtungen installiert. Primäres Ziel war es zunächst, durch Porenwasserdruck- und Sickerwassermengenmessungen den Erfolg der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen zu belegen und auf der Basis der gesammelten Daten den abschließenden Standsicherheitsnachweis für die Staumauer zu führen. Nach dem Ende der Sanierung wurden die Messeinrichtungen des Mess- und Versuchsfeldes in die Talsperrenüberwachung integriert; sie dienen seither der automatisierten Erfassung von Sickerwassermengen, Porenwasserdrücken und Verschiebungen. Die Messfühler sind in mehreren Messquerschnitten (Profilen) sowie in einem Raster auf der Luft- und Wasserseite der Staumauer angeordnet. Die Datenerfassung erfolgt automatisiert durch ein Mess- und Datenerfassungssystem, das aus drei Datenloggern und einer Software zur Datenverteilung besteht.

Insgesamt wurden in der Ennepestaumauer rund 40 Sensoren installiert. In den Messquerschnitten F1 und F2 (vgl. Abb. 6.3) wurden kombinierte Gewichts- und Schwimmlote sowie Inklinometer zur Neigungsmessung eingebaut, während sich in den Messquerschnitten E überwiegend Sensoren zur Porenwasserdruck- und Temperaturmessung befinden. Die Messquerschnitte D dienen der Temperaturmessung im und am Mauerkörper. Aufgrund der beschriebenen guten Ausstattung mit automatisierten Messeinrichtungen und der Verfügbarkeit von langjährigen Messschrieben wurde die Ennepetalsperre als Referenzsystem für die Validierung des Bauwerksmonitoringsystems RAMON gewählt.

6.2.2 Messdaten

Die aus der automatisierten Datenerfassung der Ennepetalsperre stammenden Werte bilden die Grundlage für die nachfolgend beschriebenen Validierungsschritte. Von besonderem Interesse sind dabei die für eine Bewertung des Staumauerverhaltens relevanten Messgrößen. Hierzu zählen neben den Lotmesssungen in den Profilen F1 und F2 die Stauhöhe und die Lufttemperatur, die in den Profilen D1 und D2 erfasst werden. Relevant sind somit folgende Messreihen:

- Stauhöhe
- D2L1 (Lufttemperatur)
- F2PX (Gewichtslot in Profil F2, x-Richtung (wasser-/luftseitig))
- F2PY (Gewichtslot in Profil F2, y-Richtung)
- F2SX (Schwimmlot in Profil F2, x-Richtung (wasser-/luftseitig))
- F2SY (Schwimmlot in Profil F2, y-Richtung)

Für die oben genannten Messreihen sind Daten aus einem ca. 26-monatigen Zeitraum (803 Tage) verfügbar, für den die gemittelten Tageswerte vorliegen (vgl. Abb. 6.4). Zur realistischen Validierung des Monitoringsystems werden bewußt die unbereinigten Messreihen verwendet, um das Systemverhalten auch im Hinblick auf fehlerhafte Schriebe überprüfen zu können. Fehler sind deutlich in den Messschrieben aus Abb. 6.4 z.B. in Woche 70 (Gewichts- und Schwimmlot) sowie in Woche 107 (ebenfalls Gewichts- und Schwimmlot) zu erkennen. Die Fehler sind auf Störungen bzw. Fehlfunktionen in der vor Ort installierten, konventionellen Datenerfassung zurückzuführen, sodass zu diesen Zeitpunkten entweder keine oder keine plausibel erklärbaren Werte gemessen wurden.

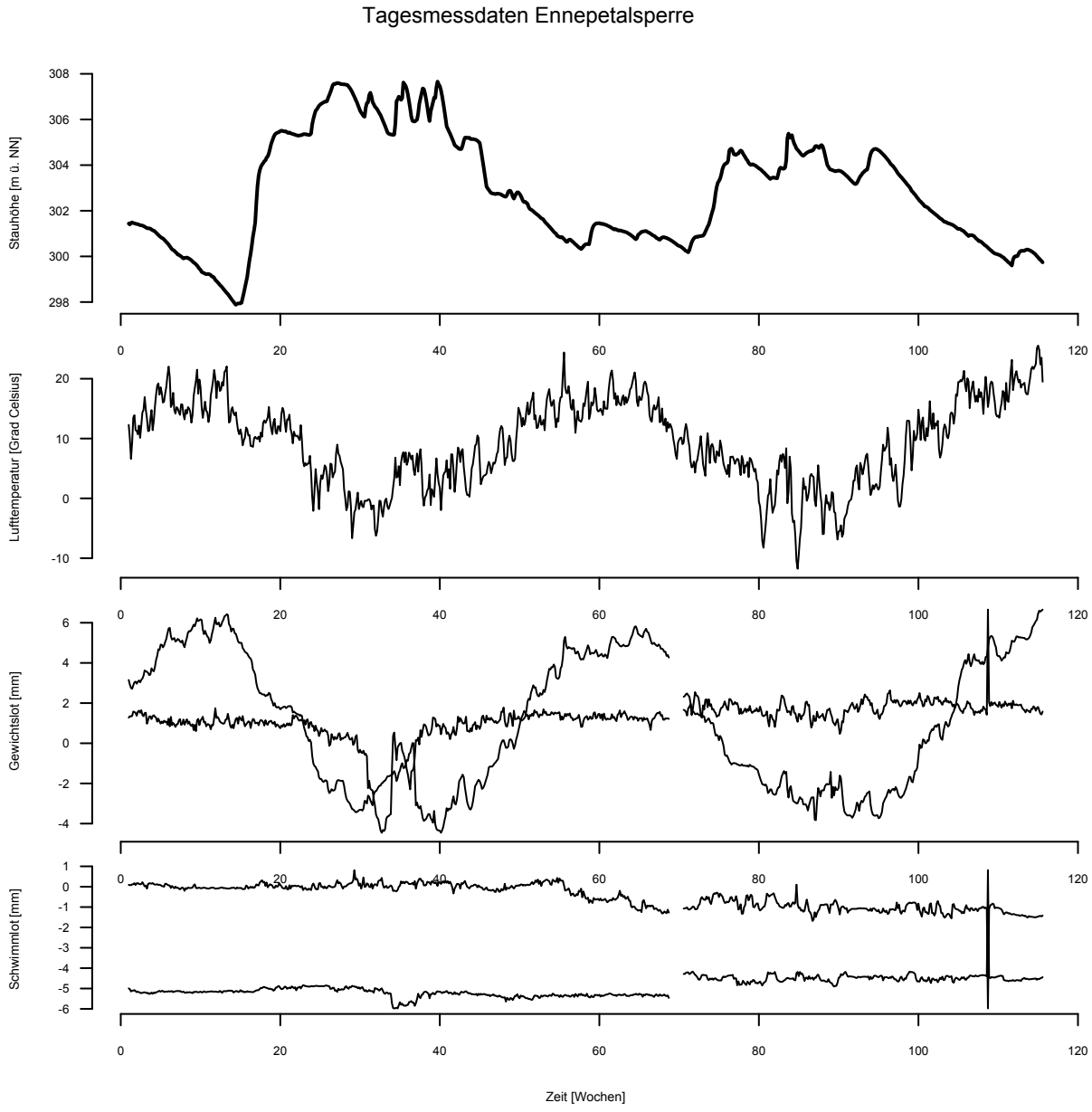


Abbildung 6.4: Der Validierung zugrundegelegte Messwerte aus der automatisierten Datenerfassung der Ennepetalsperre

6.2.3 Fiktives Szenario

Eine Verteilung des entwickelten Bauwerksmonitoringsystems RAMON auf das Rechnernetz des Ruhrverbandes und eine Validierung durch die Monitoringbeteiligten erschien im Hinblick auf den laufenden Talsperrenbetrieb und die hohen Sicherheitsanforderungen sowohl an die Talsperre als auch an die IT-Infrastruktur nicht sinnvoll. Um das Monitoringsystem dennoch über mehrere Rechner zu verteilten, wird das System anhand eines fiktiven Szenarios validiert, das sich an der Praxis orientiert und auf den in Unterabschn. 4.1.2 beschriebenen Monitoringablauf aufbaut. Das Bauwerksmonitoringsystem wird hierbei auf mehrere Rechner des lehrstuhleigenen Netzes verteilt.

Als Szenario dient das verteilte Arbeiten der Fachexperten Talsperrenmeister (TSM), Talsperreningenieur (TSI) und Abteilungsleiter (ABT). Es wird vorausgesetzt, dass die Beteiligten an den Dienstorten Ennepetalsperre (Talsperrenmeister und -ingenieur; „Betriebsstelle Ennepetalsperre“) sowie Essen (Abteilungsleiter; „Zentrale“) arbeiten. Die räumliche Verteilung der Beteiligten wird dabei durch die Verteilung des Systems auf mehrere Rechner simuliert. Jeder Fachexperte wird durch einen generischen Agententypen abgebildet, der seinerseits mit dem Bauwerksmonitoringsystem interagiert.

Das gewählte Szenario umfasst somit die beiden Teilszenarien (i) Plausibilitätskontrolle und (ii) Analyse der Messwerte. Zwischen diesen beiden Teilszenarien wird explizit unterschieden, weil diese Aufteilung der Praxis entspricht. Basierend auf [Ruhrverband 99] werden als *Plausibilitätskontrolle* alle Tätigkeiten definiert, die der Erkennung grober Abweichungen schon bei der Erfassung sowie der kurzfristigen Kontrolle der Messwerte dienen. Diese Tätigkeiten werden täglich vom Personal vor Ort, wie z.B. dem Talsperrenmeister oder speziell geschulten Messtrupps, ausgeführt. Die *Analyse* umfasst dagegen die Tätigkeiten zur mittelfristigen Überprüfung der Messwerte, zur jährlichen Analyse für den Sicherheitsbericht sowie zur Langzeitanalyse im Rahmen einer vertieften Überprüfung; sie wird in einer eigenen Abteilung von Fachingenieuren aus dem konstruktiven Ingenieur- oder Wasserbau durchgeführt.

In den folgenden Abschnitten wird das entwickelte Bauwerksmonitoringsystem in Bezug auf die beiden zuvor definierten Teilszenarien validiert.

6.3 Plausibilitätskontrolle der Messwerte

6.3.1 Erkennung grober Abweichungen und rechnerbasierte Vorbewertung

Die tägliche Kontrolle der Messwerte gehört zu den wesentlichen Aufgaben des Talsperrenmeisters (TSM). Wie oben beschrieben, sollen hierdurch frühzeitig grobe Abweichungen der Messwerte erkannt werden. Der TSM verschafft sich deshalb zu Dienstbeginn einen Überblick über die aktuelle Situation an der Talsperre und die automatisiert erfassten Messwerte prüfen. Um den Zugriff auf das Bauwerksmonitoringsystem zu ermöglichen, ist auf dem Arbeitsplatzrechner des TSM ein persönlicher Agent installiert, der über das Internet mit dem Messrechner an der Ennepetalsperre und über das lokale Netzwerk (LAN) in der Betriebsstelle mit der lokalen Messdatenbank kommunizieren kann.

Wenn der TSM seinen persönlichen Agenten startet, erscheint die grafische Benutzungsschnittstelle des persönlichen Agenten. Im Hauptfenster des GUI öffnet sich selbsttätig das Fenster *Ennepe Site Diagnosis*, das die vom Bauwerksmonitoringsystem automatisiert durchgeführte Vorbewertung der Messwerte für die Ennepetalsperre visualisiert (vgl. Abb. 6.5).

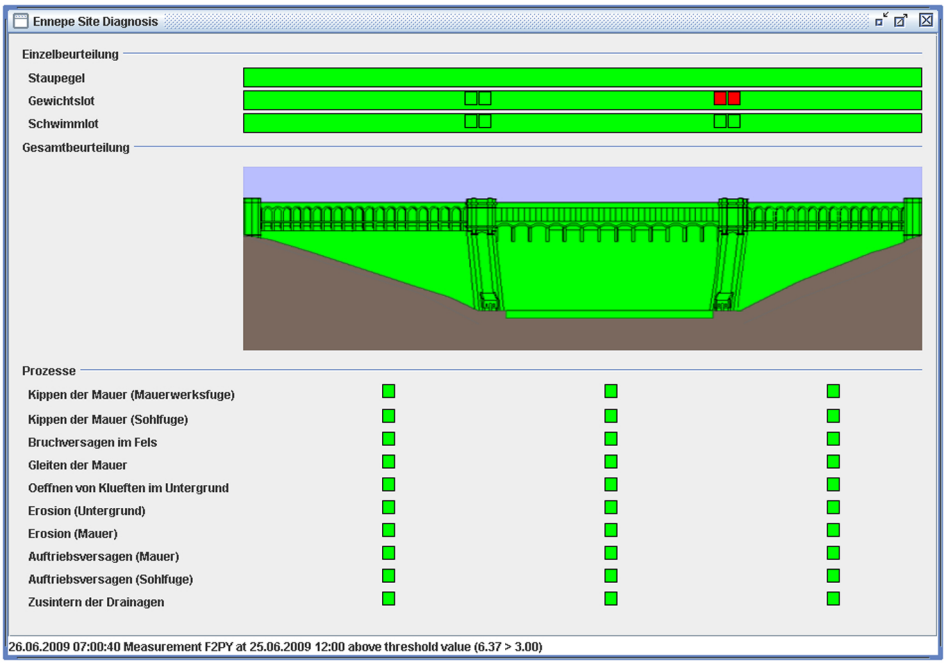


Abbildung 6.5: Unterfenster zur Visualisierung der automatisiert durchgeführten Vorbewertung der Messwerte für die Ennepetalsperre

Über das Bauwerksmonitoringsystem wird dem Talsperrenmeister gemeldet, dass an zwei Messstellen (F2PX und F2PY) stark abweichende Messwerte vorliegen. Dies wird durch die rote Kennung der Einzelbewertungen für die Messstellen F2PX und F2PY signalisiert. Das System gibt zusätzlich Warnmeldungen aus, die weitere textuelle Informationen zur Bewertung enthalten. Aus der Warnmeldung erfährt der Talsperrrenmeister, dass bei der letzten Prüfung der definierte Schwellenwert für den Sensor F2PY überschritten wurde. Der TSM stellt fest, dass jedoch alle weiteren Messwerte innerhalb der vorgegebenen Schwellenwerte liegen. Da die weiteren automatisierten Prüfungen des Monitoringsystems, wie die Prüfung auf Phänomene oder kritische physikalische Prozesse, keine Indizien für standsicherheitsgefährdende Veränderungen des Staubauwerks liefern, diagnostiziert das System — trotz der stark abweichenden Messwerte für F2PX und F2PY — ein standsicheres Bauwerk.

Durch die automatisierte Vorbewertung der Messwerte kann der Talsperrenmeister folglich zeitnah vom Bauwerksmonitoringsystem über stark abweichende Messwerte informiert und in der Einschätzung der Situation effektiv unterstützt werden. Er kann seine Kontrolle nun auf die stark abweichenden Messstellen konzentrieren. Er prüft hierzu im folgenden Schritt die aktuell an der Ennepetalsperre gemessenen Werte.

6.3.2 Ansicht der aktuellen Messdaten

Nachdem das Bauwerksmonitoringsystem stark abweichende Messwerte für eine Lotanlage der Ennepetalsperre gemeldet hat, ist der Talsperrenmeister daran interessiert, diese Messwerte mit einer Ansicht bzw. Prüfung der aktuellen Messdaten zu bewerten.

Das Bauwerksmonitoringsystem RAMON bietet die Möglichkeit, über die grafische Benutzungsschnittstelle des persönlichen Agenten direkt auf die Datenerfassungsgeräte und damit auf aktuelle Messdaten („Online-Daten“) zuzugreifen. Zugriffe erfolgen über das Unterfenster *Data Center*, das sowohl den Zugriff auf Online-Daten als auch die gezielte Auswahl und

die Aufbereitung von Messwerten sowie die Abfrage von Informationen zu den überwachten Bauwerken ermöglicht.

Für den Zugriff auf die Online-Daten der Ennepetalsperre gibt der TSM im Bereich *DAQ Systems* des *Data Center* den Namen des in situ installierten Datenloggers ein. Da die Sensoren der Ennepetalsperre vom Datenlogger mit dem Namen ennepe-logger2 erfasst werden, gibt der TSM dessen Namen ein (vgl. Abb. 6.6).

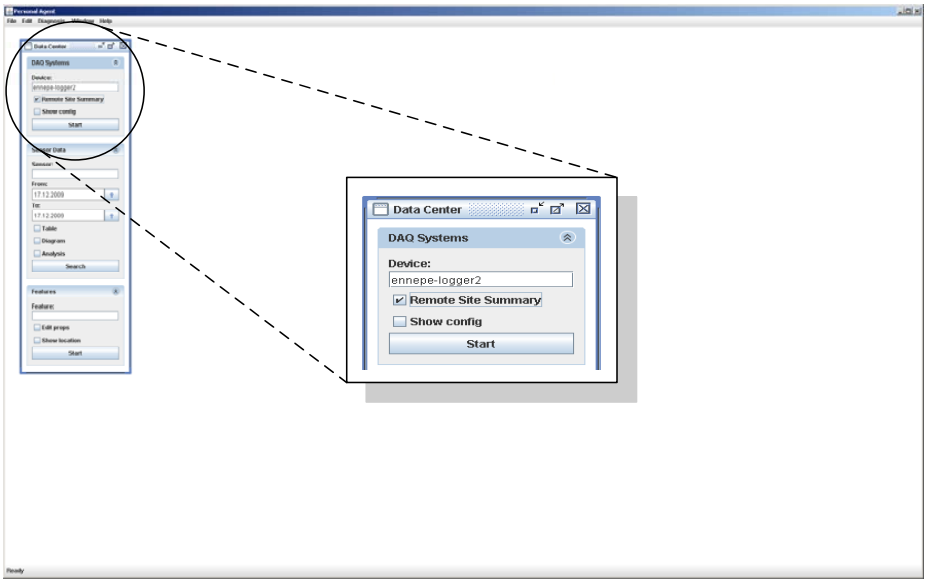


Abbildung 6.6: Zugriff auf aktuelle Messwerte („Online-Daten“) über die grafische Benutzungsschnittstelle

Es erscheint ein Unterfenster, das die aktuellen Werte der vom Datenlogger gemessenen Sensoren — in Diagrammform aufbereitet — zusammenfassend darstellt (s. Abb. 6.7).

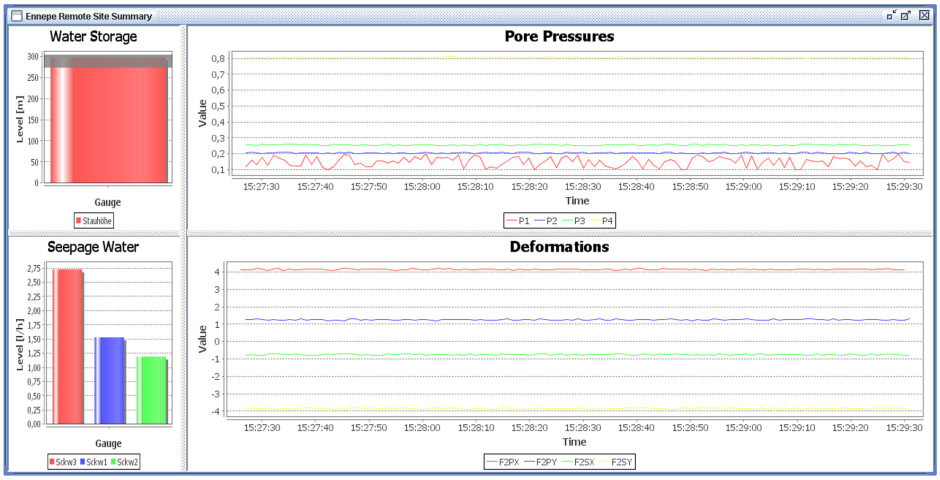


Abbildung 6.7: Unterfenster zur Visualisierung der Online-Daten

Hierdurch kann sich der TSM einen Überblick über die aktuelle Situation am entfernten Bauwerk verschaffen. Messdaten werden — nach Sensorart gruppiert — in mehreren Zeitreihendiagrammen visualisiert. Für das Referenzsystem Ennepetalsperre sind insbesondere die Porenwasserdrücke und die Verschiebungen in jeweils einem Diagramm (s. Abb. 6.7) zusammengefasst. Im linken oberen Bereich des Fensters ist die aktuelle Stauhöhe in Form eines Säulen-

diagramms dargestellt. Darunter befindet sich ein Säulendiagramm mit den aktuellen Sickerwassermengenmessung aus dem Kontrollstollen der Staumauer. Auf der rechten Seite des Fensters sind zwei Zeitreihendiagramme zur Visualisierung der aktuellen Porenwasserdruck- und Verformungsmessungen angeordnet.

Im vorliegenden Fall stellt der Talsperrenmeister nach Betrachtung der Messdaten fest, dass die aktuellen Messdaten keine ungewöhnlich hohen Werte aufweisen, sondern hinsichtlich Größe und Verlauf plausibel sind und kritische Veränderungen des Staubauwerks ausgeschlossen werden können. Offensichtlich handelt es sich bei dem festgestellten Ausreißer um einen Messfehler, der durch eine äussere Störung des Messprozesses verursacht wurde. Dies ist bei der Messung der Verformung, z.B. durch eine Berührung des Lotdrahtes oder durch Kondenswasser auf den optischen Sensoren, möglich. Der TSM informiert somit den Leiter der Betriebsstelle und teilt ihm mit, dass von der Lotanlage im Profil F2 zwar einzelne Messfehler vorliegen, aber dennoch nach Prüfung der aktuellen Messwerte kein Störfall festzustellen ist.

6.3.3 Kurzfristige Kontrolle der Messwerte

Der Talsperreningenieur (TSI) ist als Leiter der Betriebsstelle verpflichtet, die Meldung des Talsperrenmeisters zu überprüfen. Ihm obliegt es, grobe Abweichungen der Messwerte zu erkennen, aber vor allem Messwerte im Kurzzeitbereich von mehreren Tagen bis hin zu mehreren Wochen zu kontrollieren.

Die kurzfristige Kontrolle erfolgt üblicherweise durch die Aufbereitung der Messwerte in Diagrammform und durch visuelle Prüfung der Diagramme. Die visuelle Prüfung der über einen Zeitraum von mehreren Tagen gefilterten Messwerte ist häufig aussagekräftiger als die Betrachtung einzelner momentaner Messwerte, da Veränderungen in längeren Messreihen, wie z.B. Trends oder abweichende Messwerte, vom menschlichen Augen besser erkannt werden können.

Im Bauwerksmonitoringsystem RAMON wird die kurzfristige Kontrolle der Messwerte durch die automatisierte Erstellung von entsprechenden Berichten gezielt unterstützt. Messberichte werden täglich erstellt, wobei den zu Tagesmittelwerten gefilterten Verläufen wichtiger Messgrößen besondere Bedeutung zukommt. Die Berichte werden an zentraler Stelle im Intranet des Ruhrverbands abgelegt.

Der TSI öffnet den entsprechenden Bericht für die Ennepetalsperre (s. Abb. 6.8). Der Bericht stellt den Verlauf der Messgrößen Stauhöhe, F2PX und F2PX über den Zeitraum von einer Woche zusammenfassend dar. Im vorderen Teil des Berichts sind die Tagesmittelwerte der betrachteten Messgrößen tabellarisch zusammengestellt.

Unterhalb der Tabelle sind die Messwerte nochmals in Diagrammform dargestellt. Dies soll die visuelle Interpretation der Messwerte erleichtern. Der TSI stellt bei Betrachtung des oberen Diagramms fest, dass in den zurückliegenden Tagen keine groben Abweichungen übersehen wurden. Weiterhin stellt er fest, dass in der Messreihe F2PX ein steigender Trend zu erkennen ist. Besonders auffällig ist jedoch, dass die Messreihe F2PY, die zur Auslösung einer Warnmeldung geführt hat, bis auf den letzten gemessenen Wert keine Ausreißer aufweist.

Aufgrund der Messungen an Messstelle F2PY hat der Talsperreningenieur die Vermutung, dass es sich um einen Messfehler handelt. Diese Vermutung wird durch die Betrachtung des unteren Diagramms bestätigt. Die Lage des Datenpunktes im Diagramm zeigt, wie stark die letzte Messung der Lotanlage von der vorausgegangenen Messung abweicht. Die Größenordnung der Abweichung lässt den Schluss zu, dass es sich um einen Messfehler handelt.

RAMON
www.inf.bi.rub.de/monitoring

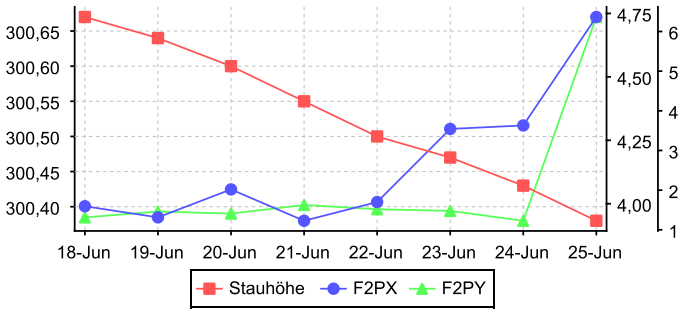
Messbericht für Ennepetalsperre

Woche ab **18/06/**[redacted]

Messdaten

Datum	Stauhoehe	F2PX	F2PY
18/06/[redacted]	300.67	3,99	1,31
19/06/[redacted]	300.64	3,95	1,46
20/06/[redacted]	300.6	4,06	1,41
21/06/[redacted]	300.55	3,93	1,63
22/06/[redacted]	300.5	4,01	1,52
23/06/[redacted]	300.47	4,29	1,48
24/06/[redacted]	300.43	4,31	1,23
25/06/[redacted]	300.38	4,74	6,37

Zusammenfassung - Diagramme



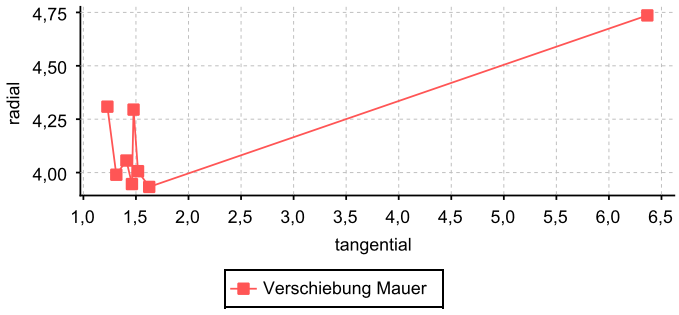


Abbildung 6.8: Automatisch generierter Messbericht

Zur abschließenden Evidenzverstärkung prüft der TSI die aktuellen Messwerte der Ennepetalsperre. Hierzu bedient er sich seines persönlichen Agenten, der über das Internet mit dem Messrechner an der Ennepetalsperre kommunizieren kann. Da der Arbeitsablauf mit dem unter 6.3.2 beschriebenen Ablauf identisch ist, wird der Ablauf an dieser Stelle nicht nochmals beschrieben. Auch der Talsperreningenieur findet keine weiteren Indizien für eine kritische Veränderung am Bauwerk und kommt zu dem Schluss, dass es sich um einen Fehler in der Datenerfassung gehandelt hat.

Das beschriebene Teilszenario zeigt, dass das Bauwerksmonitoringsystem sensitiv auf Abweichungen in den Messwerten reagiert und dennoch eine zuverlässige Vorbewertung der Messwerte liefert. Das System ist in der Lage, die Monitoringbeteiligten sowohl bei der Erkennung von Abweichungen als auch bei der Kontrolle der Messwerte auf mehreren Wegen zu unterstützen.

6.4 Analyse der Messwerte

Im zweiten Teil des fiktiven Szenarios wird die Analyse der erfassten Messwerte über einen Zeitraum von mehreren Monaten bis zu mehreren Jahren betrachtet. Es wird angenommen, dass diese Analyse vom Leiter der Fachabteilung (ABT) durchgeführt wird. Zur Interaktion mit dem Bauwerksmonitoringsystem steht auf dem Rechner des Abteilungsleiter ein persönlicher Agent zur Verfügung, der den Zugriff auf alle verteilt gespeicherten Messdaten ermöglicht.

6.4.1 Auswahl und Ansicht der Messschriebe

Der Abteilungsleiter erstellt den jährlichen Sicherheitsbericht nach [DVWK-Merkblatt 231 95] für die Ennepetalsperre. Hiernach sind die Ergebnisse der Messungen und die Beobachtungen zusammenzustellen und hinsichtlich der Talsperrensicherheit zu beurteilen. Der Schwerpunkt ist dabei auf die Darstellung der Messergebnisse zu legen, während eine mathematisch-statistische Analyse mittels geeigneter Verfahren der sog. vertieften Überprüfung vorbehalten bleibt, die alle 10 Jahre durchgeführt werden muss.

Zur Analyse wird der persönliche Agent des ABT gestartet und im Bereich *Sensor Data* des *Data Center* die Namen der Messstellen eingegeben. Da zunächst die Verformungen der Staumauer von Interesse sind, wird F2PX (Pendellot in Profil F2) als Name der Messstelle eingegeben. Danach wird der gewünschte Zeitraum ausgewählt. Da die Messdaten als Diagramm aufbereitet werden sollen, wird ein *Diagram* angefordert und die Datenabfrage gestartet (vgl. Abb. 6.9).

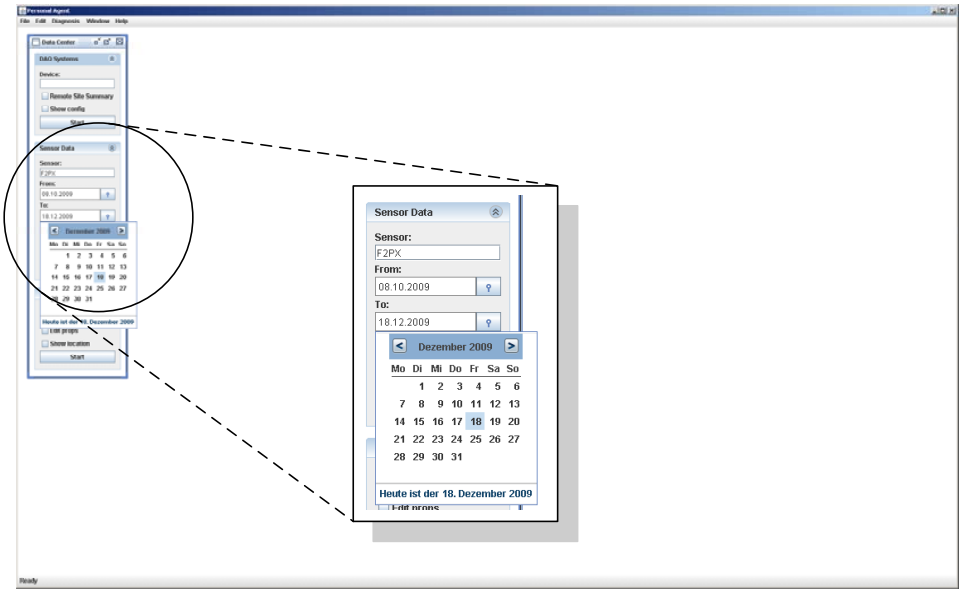


Abbildung 6.9: Zugriff auf gespeicherte Messwerte über die grafische Benutzungsschnittstelle

Nach Öffnung des entsprechenden Unterfensters für die Suche werden die ausgewählten Messdaten in einer Zeitreihe dargestellt (vgl. Abb. 6.10). Die Darstellung im Unterfenster kann durch Hinein- und Herauszoomen verändert werden; außerdem ist ein Export in ein Grafikformat und ein Ausdrucken des Diagramms möglich.

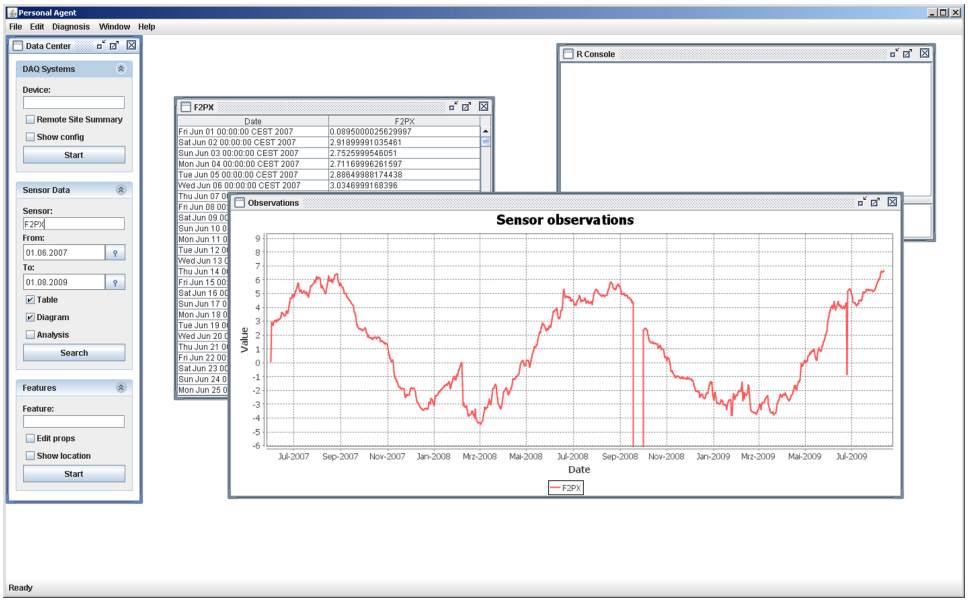


Abbildung 6.10: Unterfenster zur Visualisierung der Messwerte als Zeitreihe

Der ABT setzt die Analyse der Messwerte mit der Ansicht von Messreihen für die Stauhöhe, für das Pendellot in y-Richtung (F2PY) und für die am Bauwerk gemessene Temperatur (D2L1) fort, da hier ggfs. signifikante Veränderungen zu beobachten sind.

6.4.2 Regressionsanalyse der radialen Verformungen

Auch die Ermittlung von Staumauerverformungen ist Sache des ABT. Hierzu werden mathematisch-statistische Verfahren eingesetzt. Eine derartige Untersuchung wird üblicherweise alle 10 Jahre im Rahmen einer Vertieften Überprüfung gemäß DVWK-Merkblatt 222 [DVWK-Merkblatt 222 91] durchgeführt.

Im Rahmen dieser Analyse wird zunächst der Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen Stauhöhe, Temperatur und Zeit und der Zielgröße radiale Verformung der Staumauer untersucht. Hierzu werden im *Data Center* die entsprechenden Messreihen für die Temperatur und Stauhöhe im Betrachtungszeitraum ausgewählt und die zugehörige Analyse durchgeführt. Die ausgewählten Messdaten werden dabei durch das Bauwerksmonitoringsystem aus der Messdatenbank geladen und an den Statistikagenten weitergeleitet, wo diese dann für eine statistische Analyse zur Verfügung stehen.

Die statistische Analyse wird in einem eigenem Unterfenster des persönlichen Agenten durchgeführt, das als Konsole ausgelegt wurde. Die Konsole besteht aus zwei Bereichen, einem Eingabebereich und einem Ausgabebereich. Darüber hinaus können auch grafische Ausgaben erzeugt werden, die in einem eigenen Unterfenster innerhalb der grafischen Benutzungsschnittstelle dargestellt werden. Abb. 6.11 zeigt die Konsole und eine mithilfe der Konsole erzeugte Grafik, die mehrere Diagramme zur Visualisierung der Messgrößen Pendellot in x- und y-Richtung sowie Stauhöhe, Temperatur und Zeit enthält.

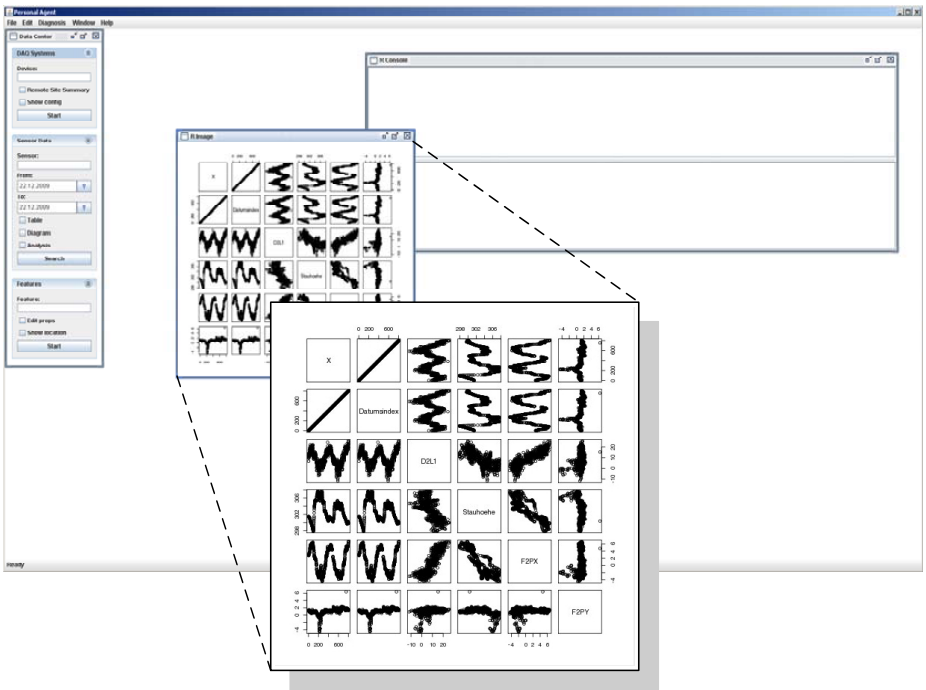


Abbildung 6.11: Darstellung der Zeitreihen

Als statistisches Verfahren zur Quantifizierung der Zusammenhänge zwischen Stauhöhe, radialer Verformung und Temperatur wird die multiple lineare Regression angewendet; hierzu sind folgende Anweisungen einzugeben:

```
ennepe.lm <- lm(data$F2PX ~  data$D2L1
        + data$Stauhoehe + data$Datumsindex)
```

Die Verformung der Staumauer (F2PX) wird durch die Eingabe der obigen Anweisung als abhängige Größe modelliert, die von der Lufttemperatur (gemessen an der Messstelle D2L1), der Stauhöhe und der Zeit abhängt. Das ermittelte Regressionsmodell wird dabei in der Variable `ennepe.lm` gespeichert. Abb. 6.12 zeigt das Unterfenster mit der Eingabe des ABT sowie die Ausgabe des Bauwerksmonitoringsystems.

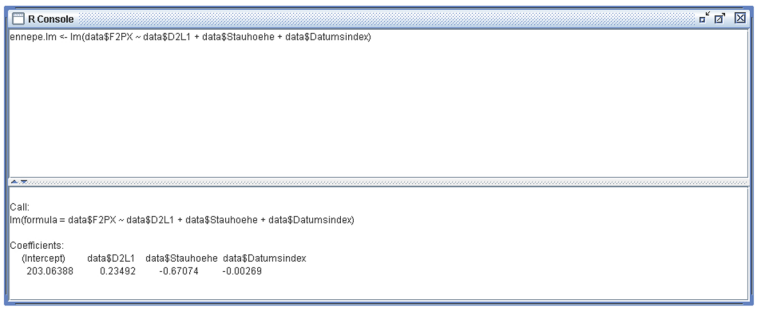

R Console
ennepe.lm <- lm(data$F2PX ~ data$D2L1 + data$Stauhoehe + data$Datumsindex)
Call:
lm(formula = data$F2PX ~ data$D2L1 + data$Stauhoehe + data$Datumsindex)
Coefficients:
(Intercept) data$D2L1 data$Stauhoehe data$Datumsindex
203.06388 0.23492 -0.67074 -0.00269

Abbildung 6.12: Unterfenster mit Konsole zur Durchführung statistischer Analysen

Das Resultat der statistischen Analyse sind die Koeffizienten des Regressionsmodells. Über die Anweisung `summary(ennepe.lm)` wird eine Zusammenfassung des Regressionsmodells ausgegeben, um die Güte der Anpassung zu überprüfen. Listing 6.1 zeigt die Ausgabe des Bauwerksmonitoringsystems, die alle relevanten Informationen zum erstellten Regressionsmodell enthält.

Listing 6.1: Zusammenfassung des berechneten Regressionsmodells

```
Call:
lm(formula = data$F2PX ~ data$D2L1 + data$Stauhoehe +
        data$Datumsindex)

Residuals:
     Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.99799 -0.77915  0.01910  0.87825  2.65046

Coefficients:
                   Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)       2.031e+02  7.093e+00   28.63   <2e-16 ***
data$D2L1         2.349e-01  7.844e-03   29.95   <2e-16 ***
data$Stauhoehe   -6.707e-01  2.320e-02  -28.91   <2e-16 ***
data$Datumsindex -2.690e-03  1.647e-04  -16.33   <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Residual standard error: 1.063 on 787 degrees of freedom
  (12 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared: 0.8958,     Adjusted R-squared: 0.8954
F-statistic:  2255 on 3 and 787 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Die Güte des gesamten Regressionsmodells lässt sich an der F-Statistik $F = 2255$ ablesen. Die F-Statistik hat einen p-Wert von kleiner als $2{,}2 \cdot 10^{-16}$ und ist somit signifikant gut. Die großen t-Werte zeigen, dass die gewählten Variablen die abhängige Größe sehr gut erklären können. Abschließend werden vom Abteilungsleiter die radialen Verformungen zusammen mit dem angepassten Regressionsmodell als Grafik ausgegeben (s. Abb. 6.13).

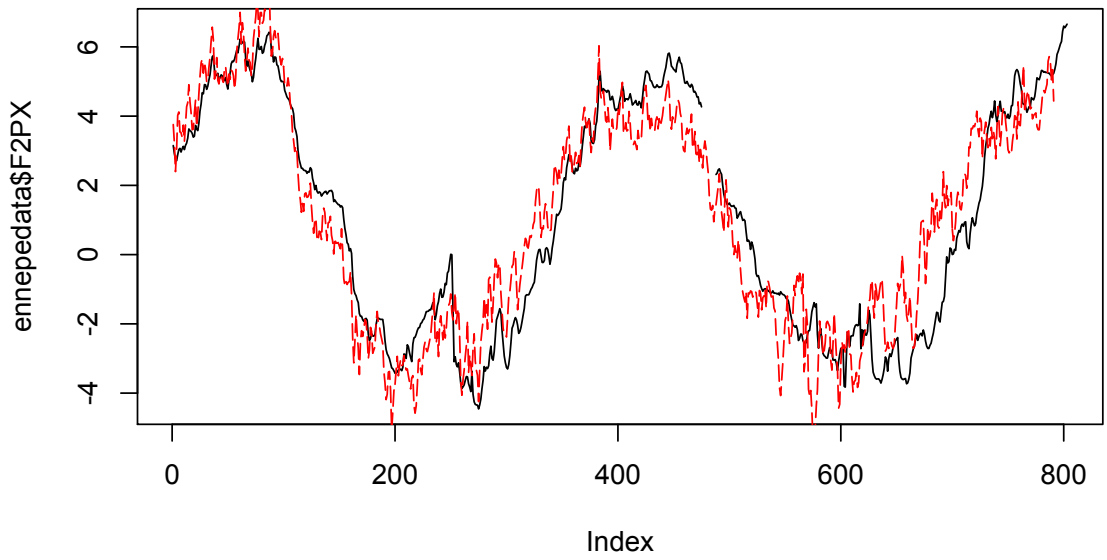


Abbildung 6.13: Radiale Verformungen (schwarz) und an die Messdaten angepasstes Regressionsmodell (rot)

6.4.3 Klassifizierung der radialen Verformungen

Aufgrund der vorliegenden Messschriebe liegt es nahe, Einwirkungskombinationen aus Stauhöhe und Lufttemperatur festzulegen, die als Eingangsgrößen für numerische Simulationen und fortgeschrittene Verfahren zur Bewertung der Bauwerkssicherheit dienen. Mit Hilfe der ermittelten Kennwerte lassen sich künstliche Ersatzzeitschriebe generieren, um die tatsächlichen Einwirkungskombinationen erfassen zu können. Grundlage der Analyse bilden dabei die oben beschriebenen Messreihen F2PX, D2L1 und Stauhöhe.

Im Bauwerksmonitoringsystem RAMON steht mit dem k-Means-Klassifizierer[1] ein einfaches und robustes Verfahren zur automatisierten Klassifizierung und Gruppierung von Daten zur Verfügung. Als Vorgabe für die automatisierte Klassifizierung wird nur die Anzahl der zu ermittelnden Klassen bzw. Gruppen benötigt. Über die Anweisung:

```
clusters <- kmeans(data2, 3)
```

an den persönlichen Agenten des ABT wird der k-Means-Klassifizierer (`kMeans`) aufgerufen, die Klassifizierung durchgeführt und das Ergebnis der Klassifizierung in der Variablen `clusters` gespeichert. Die zu klassifizierenden Daten werden in der Datenstruktur `data2` übergeben, in der die normierten Messreihen für die radialen Verformungen, die Stauhöhe und die Temperatur enthalten sind. Die durch die Statistikkomponente des Monitoringsystems ermittelten Klassen bzw. Gruppen (Lastkombinationen) sind in Tabelle 6.1 dargestellt: *Gruppe 1* steht stellvertretend für ein typisches Lastszenario im Sommer mit nur geringem Füllstand der Talsperre (300,39 m), aber hohen Temperaturen (16,1 Grad Celsius) und einer daraus resultierenden, relativen wasserseitigen Verformung der Staumauer (4,7 mm). Gruppe 2 repräsentiert eine Übergangssituation mit einem mittleren Füllstand der Talsperre (302,76

[1] Der k-means-Algorithmus wird in Anhang B erläutert.

m), bei mittleren Temperaturen (10,5 Grad Celsius) und sich zur Luftseite zurückbewegenden Verformungen der Staumauer (1,05 mm). *Gruppe 3* repräsentiert schließlich eine typische Einwirkungskombination im Winter, bestehend aus einem hohen Füllstand der Talsperre (305.15 m) und niedrigen Temperaturen (2,4 Grad Celsius).

Tabelle 6.1: Mittels des k-Means-Klassifizierers berechnete Einwirkungskombinationen für die Ennepetalsperre

Gruppe (Cluster)	**Stauhoehe** m ü. NN	**Temperatur** ° Celsius	**F2PX** mm
1	300.387	16.1	4.700
2	302.762	10.5	1.053
3	305.155	2.4	-2.328

Zur Visualisierung werden die entsprechend der aufgefundenen Klassen eingefärbten Messwerte in einem dreidimensionalen Streudiagramm angezeigt (Abb. 6.14).

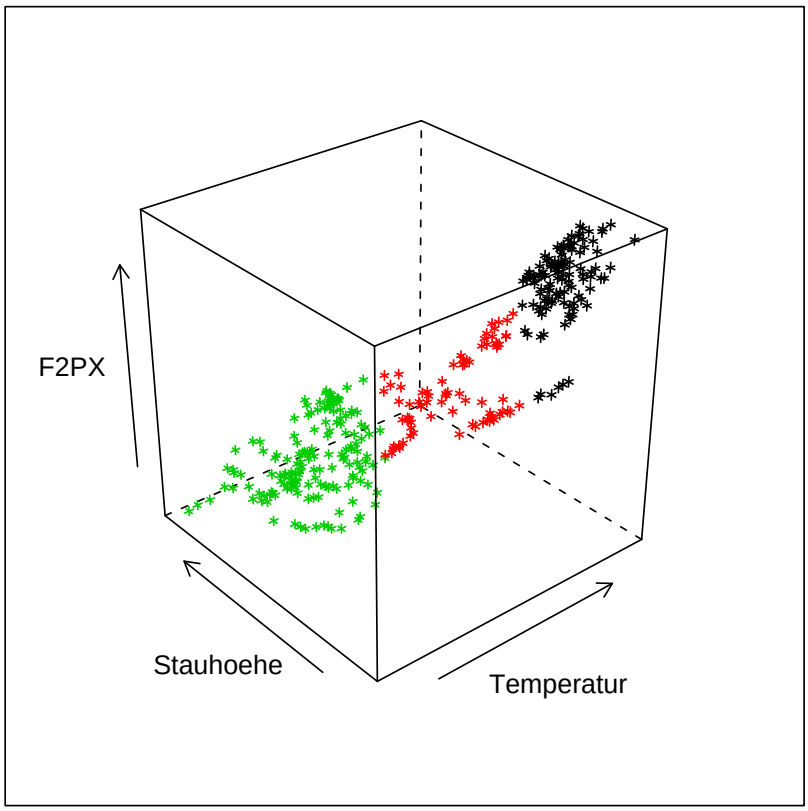


Abbildung 6.14: Automatische Gruppierung der Messwerte in drei Gruppen (schwarz = Gruppe 1, rot = Gruppe 2, grün = Gruppe 3)

6.5 Zusammenfassende Wertung

Die Funktionalitäten des entwickelten Bauwerksmonitoringsystems RAMON wurden im vorliegenden Kapitel anhand einzelner praxisbezogener Anwendungsfälle validiert. Es wurde gezeigt, wie das Monitoringsystem die Beteiligen in der Bearbeitung typischer Teilaufgaben der messtechnischen Langzeitüberwachung effektiv unterstützt. Hierbei wurden folgende Funktionalitäten des Systems validiert:

- **Erkennung grober Abweichungen:** Die täglich durchzuführende Kontrolle der Messwerte wird durch das Monitoringsystem unterstützt, indem die erfassten Messgrößen vom System auf ihre Plausiblität hin überwacht werden und eine automatisierte, regelbasierte Vorbewertung der Messwerte durchgeführt wird. Die zur Kontrolle der Messdaten erforderliche Fachlogik ist dazu in einen besonderen Agententypen integriert, der die Ausführung zeitlich steuert und die verantwortlichen Fachexperten über eine grafische Benutzungsschnittstelle Informationen zu stark abweichenden Messwerten bereitstellt.
- **Zugriff auf Online-Daten:** Die Mess- und Datenerfassungssysteme sind über die auf dem Messrechner platzierten Agenten des Monitoringsystems für alle Beteiligten sicht- und steuerbar. Aktuelle Messdaten („Online-Daten“) können direkt bei den Geräten erfragt werden. Die am Monitoring Beteiligten erhalten auf diese Weise einen schnellen Überblick über die aktuellen Messungen am entfernten Messort.
- **Aufbereitung von Messdaten in Diagramm- und Berichtsform:** Die erfassten Messgrößen werden systemweit verteilt in mehreren Messdatenbanken mit unterschiedlicher zeitlicher Verdichtung gespeichert. Eine Abfrage und Aufbereitung der Messgrößen erfolgt über die angepasste grafische Benutzungsschnittstelle des Monitoringsystems. Die Daten können hierbei mittels eines einfachen Dialogs abgerufen und durch mehrere Diagrammarten aufbereitet werden.
- **Analyse von Messdaten:** Zur Analyse von Messreihen auf der Basis statistischer Methoden und Verfahren steht ein spezialisierter Agententyp bereit, der die Programmierung und Ausführung von statistischen Analyseprozessen ermöglicht. In geeigneten Skripten können spezifische Analyseverfahren umgesetzt und Auswertungsschritte automatisiert werden. Dem Benutzer stehen hierbei zahlreiche statistische Methoden und Verfahren, wie z.B. die Zeitreihen-, Regressions- und die Clusteranalyse, zur Verfügung.

Das Anwendungsbeispiel Talsperrenüberwachung zeigt, dass auf der Basis des Multiagentensystems RAMON alle relevanten Arbeitsschritte der messtechnischen Langzeitüberwachung praxisnah abgebildet werden können. Die spezifischen Anforderungen an ein modernes Bauwerksmonitoringsystem, wie z.B. der einfache Zugriff auf verteilt gespeicherte Messdaten oder die Integration einer statistischen Datenauswertung, wurden in ein leistungsfähiges System implementiert, wobei die Übertragbarkeit des Multiagentensystems auf andere Bauwerkstypen, wie z.B. Brücken oder Tunnel, durch das zugrundeliegende Datenmodell sichergestellt wird.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein computerbasiertes System zur Unterstützung der messtechnischen Dauerüberwachung von Bauwerken, des Bauwerksmonitorings, entwickelt, das alle relevanten Schritte des Bauwerksmonitorings von der Erfassung bis zur Nutzung der Messdaten abbildet und für jeden Arbeitsschritt spezifische Funktionalitäten bereitstellt.

Hierzu wurde zunächst ein allgemeiner Monitoringablauf analysiert. Die Grundlage für diesen Monitoringablauf lieferte ein in der Praxis zur Überwachung von Staubauwerken durchgeführter Arbeitsablauf, der von bauwerksspezifischen Arbeitsschritten abstrahiert wurde. Der Monitoringablauf umfasst mehrere Einzelschritte, die auf den verteilt anfallenden und gespeicherten Messdaten ausgeführt werden. Der Monitoringablauf wurde als Prozess mit den Schritten Erfassung, Verteilung, Aufbereitung, Pflege und Nutzung von Messdaten formalisiert und der anschließenden Realisierung des Bauwerksmonitoringsystems zugrundegelegt.

Als informatischer Lösungsansatz zur softwaretechnischen Realisierung des Bauwerksmonitoringsystems wurde ein Multiagentensystemansatz gewählt, der das verteilte Arbeiten der am Monitoring beteiligten Fachexperten auf der Basis einer dezentralen Problemlösungsstrategie abbildet. Die Implementierung erfolgte schließlich in dem Multiagentensystem **RAMON**, wobei die für die Durchführung des Monitoringablaufs erforderliche Logik auf die dezentralen Systemknoten, die Softwareagenten, verteilt wird, die jeweils eine spezifische Aufgabe unabhängig oder — bei Bedarf — auch in Kooperation mit anderen Softwareagenten bearbeiten:

1. Die **Erfassung** der Messdaten wird von zwei spezialisierten Agententypen durchgeführt. Zur aktiven Steuerung und Interaktion mit Mess- und Datenerfassungssystemen wird ein Sensorikagent verwendet, der die Fachlogik zur physischen Interaktion mit den Geräten enthält. Zur losen Kopplung mit den Mess- und Datenerfassungssystemen wird ein Messdateiagent eingesetzt, der die erfassten Messgrößen aus Dateien ausliest und auf diese Weise die bestehenden Systeme nutzbar macht.

2. Zur **Verteilung** der Messdaten wurde ein spezialisierter Agententypen realisiert, der für die Übertragung der Messdaten von einem lokalen Messrechner zu einem oder mehreren Zielrechnern verantwortlich ist. Da die Verteilung von Messdaten eine wiederkehrende Aufgabe darstellt, kann der Agent zeitlich gesteuert werden. Messdaten können dabei entweder kabelgebunden über das Internet oder über das Mobilfunknetz vom Ort der Erfassung zu einem Zielrechner übertragen werden.

3. Zur **Aufbereitung** der Messdaten wurde ein weiterer, spezialisierter Agententyp entwickelt, der die Messdaten entgegennimmt und in ein eigenständiges Zielformat bringt. Dieser Agententyp übernimmt die Funktion eines Datentransformators, der mit den Quelldaten ein intern verwendetes Datenmodell erzeugt. Für jedes Messdatenformat existiert im Bauwerksmonitoring ein Datenverarbeitungsagent, der die Fachlogik zur Umwandlung der Messdaten bereitstellt. Das Bauwerksmonitoringsystem ist durch diesen Ansatz leicht auf weitere proprietäre Messdatenformate erweiterbar.

4. Die **Pflege** von Messdaten wird durch die persistente Speicherung von Messdaten in einem relationalen Datenbanksystem unterstützt. Hierzu wurde ein geeignetes Datenbankschema entwickelt, das alle Informationen des intern verwendeten Datenmodells enthält und ohne Informationsverlust auf die relationale Struktur des eingesetzten Datenbanksystems abbildet. Erfasste Messgrößen können in einer Datenbank mit allen relevanten Daten zum Zeitpunkt und Ort der Messung sowie weiteren Metainformationen gespeichert werden.

5. Die **Nutzung** der Messdaten wird auf mehreren Ebenen unterstützt. Es wurde ein Agententyp zur Vorbewertung der Messdaten entwickelt, der abweichende Messwerte detektiert und die Monitoringbeteiligten über mögliche kritische Prozesse informiert. Zur Plausibilitätskontrolle von Messdaten und zur Prüfung des Kurzzeit-Bauwerksverhaltens wurde ein Berichtsagent implementiert, der eine automatisierte Erzeugung von Messberichten und die Aufbereitung von Messdaten in Diagrammform ermöglicht. Zur modellfreien, statistischen Auswertung von Messdaten wurde ein Statistikagent entwickelt, der eine Statistiksoftware in das Bauwerksmonitoringsystem integriert und auf diese Weise zahlreiche statische Verfahren bereitstellt. Der Nutzer interagiert mit dem Bauwerksmonitoringsystem über eine komfortable grafische Benutzungsschnittstelle, die einen direkten Zugang zu den Messdaten, eine geräte- und ortsbezogene Suche sowie statistische Funktionalitäten bereitstellt.

Die kollaborative Zusammenarbeit der einzelnen Agententypen im Bauwerksmonitoringsystem wird durch eine auf das Bauwerksmonitoring zugeschnittene Fachontologie und die Implementierung von agentenspezifischen Interaktionsprotokollen sichergestellt. Auf der Grundlage der Fachontologie sind die Agenten in der Lage, selbsttätig Information zu erfragen und untereinander Daten auszutauschen. Den Kern der Fachontologie bildet dabei ein internes, auf unterschiedliche Bauwerksarten anwendbares Datenmodell, das die zentralen Begriffe der Domäne Bauwerksmonitoring aufnimmt und mit einer semantischen Beschreibung verknüpft.

Das entwickelte Bauwerksmonitoringsystem wurde abschließend an einem praxisorientierten Szenario aus der Talsperrenüberwachung validiert. Anhand von mehreren Beispielen wurde gezeigt, wie die Monitoringbeteiligten in der Bearbeitung üblicher Arbeitsschritte unterstützt werden. Es wurde unter anderem erläutert, wie die an einem Referenzbauwerk erfassten Messgrößen mithilfe des entwickelten Multiagentensystems analysiert und die Messdaten hinsichtlich der baulichen Sicherheit interpretiert werden können.

7.2 Bewertung der Ergebnisse

Im Rahmen dieser Dissertation wurde das seit kurzem in der Ingenieurinformatik etablierte Agentenparadigma auf die Domäne „Bauwerksmonitoring“angewendet. Durch die konsequente agentenorientierte Zerlegung des Monitoringproblems wird die wirklichkeitsnahe Abbildung des in der Praxis verteilt ablaufenden Monitoringprozesses und die Integration der bestehenden Mess- und Datenerfassungssysteme, wie z.B. der vor Ort installierten Sensoren und

Datenerfassungsgeräte, erreicht. Im Zentrum der entwickelten Lösung stehen die kollaborativ ausgelegten Softwareagenten, die jeweils spezifische Fachlogik zur Bearbeitung eines Arbeitsschritts aufnehmen und durch ihr Zusammenwirken ein leistungsfähiges Monitoringsystem ergeben. Das Gesamtproblem Monitoring wird somit durch die Verzahnung der einzelnen Agententypen gelöst, wobei erst durch die Interaktion zwischen den Agententypen eine geschlossene Bearbeitungskette entsteht.

Auf methodischer Ebene vereinfacht die Einführung einer neuen Abstraktion, des Softwareagenten, die Implementierung des verteilten Monitoringsystems. Im Vergleich zum bewährten objektorientierten Ansatz bietet das Agentenparadigma demnach einen neuartigen Ansatz zur Zerlegung und Modellierung verteilter komplexer Systeme, der sich insbesondere bei der Umsetzung des verteilt ablaufenden Monitoringprozesses und der Realisierung von komplexen Interaktionen zwischen den autonom agierenden Systemknoten als sehr leistungsfähig erweist. Die sprechaktbasierte Kommunikation der verwendeten Agentenkommunikationssprache FIPA-ACL erlaubt es, die Aktionen der einzelnen Agenten effektiv zu koordinieren und in den Nachrichten heterogene Daten beliebiger Komplexität, beispielsweise Messwerte, Analyseergebnisse und Steuerungsbefehle für die Sensorikkomponenten, auszutauschen. Hierbei ist auch die enge Kopplung des Agentenansatzes mit einer ontologiebasierten Wissensdarstellung von Vorteil, da das zur Problembearbeitung erforderliche Fachwissen, wie z.B. Datenformate oder Informationen über den Messvorgang, mittels einer gemeinsamen Fachontologie für die Domäne Bauwerksmonitoring auf die Agenten übertragen wird.

Auf fachlicher Ebene werden durch die Anwendung des Multiagentensystemansatzes und die ganzheitliche Betrachtung des Monitoringprozesses Verbesserungen gegenüber den bestehenden Bauwerksmonitoringsystemen erreicht. Hervorzuheben sind die durch das Monitoringsystem gebotene (i) durchgängige Softwareunterstützung, (ii) zeitnahe Entscheidungsunterstützung und (iii) integrierte Datenauswertung.

Für eine **durchgängige Softwareunterstützung** wurde der softwaretechnischen Realisierung des Bauwerksmonitoringsystems ein allgemeiner Monitoringablauf zugrundegelegt, der alle Arbeitsschritte des Bauwerksmonitoring umfasst. Die bisher händisch ausgeführten und sinnvoll automatisierbaren Teilschritte des Monitoringprozesses werden von spezialisierten Agententypen bearbeitet, sodass die Monitoringbeteiligten von Routineaufgaben entlastet werden. Für eine **zeitnahe Entscheidungsunterstützung** werden die erfassten Messdaten auf der Basis der entwickelten agentenbasierten Infrastruktur zeitnah in Datenbanksystemen abgelegt und den Beteiligten über ihren persönlichen Agenten bereitgestellt, der einen gezielten Zugriff auf die Hard- und Softwareressourcen des Bauwerksmonitoringsystems ermöglicht. Zusätzlich stellen auf die Auswertungsaufgabe abgestimmte Agententypen Vorbewertungen und grafische Aufbereitungen der Messwerte bereit, um die Kontrolle der Messwerte durch die Beteiligten zu erleichtern. Eine **integrierte Datenauswertung** wird durch die Bereitstellung von Methoden und Verfahren zur statistischen Datenauswertung erreicht. Die Benutzer können über die grafische Benutzungsschnittstelle des Bauwerksmonitoringsystems die zu analysierenden Daten aus der Datenbank entnehmen und mit statistischen Methoden und Verfahren analysieren. Das System übernimmt hierbei die erforderlichen Datentransformationen und bietet den Beteiligten die Möglichkeit, Grafiken und Diagramme für die geforderten Nachweise und Berichte zu erstellen.

7.3 Ausblick

Mit der Implementierung des Bauwerksmonitoringsystems **RAMON** wurde das Ziel verfolgt, die räumlich verteilt anfallenden Sensordaten zusammenführen, den erkannten Monitoringab-

lauf ganzheitlich abzubilden sowie eine Infrastruktur zu schaffen, auf deren Basis alle Mess- und Datenerfassungssysteme nutzbar und die erfassten Messdaten zeitnah verfügbar sind.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wäre in der Zukunft anzustreben, das entwickelte Multiagentensystem auch mit neuen Sensorsystemen zur Messung physikalisch-mechanischer Zustände zu verbinden. Die bisher entwickelten Ansätze wurden dabei so konzipiert, dass eine entsprechende Übertragung auch auf neuere Messtechnik, wie z.B. piezoelektrische oder MEMS-Sensoren, ohne Aufwand möglich ist. Durch die Nutzung neuer Sensorsysteme könnte die Erfassung der bisher nicht oder nur mit großem Aufwand messbaren Bauwerkseigenschaften und eine Senkung der Geräte- und Installationskosten erreicht werden.

Im Hinblick auf die zunehmende Leistungsfähigkeit von Sensoren, die Verfügbarkeit drahtloser Sensoren und die steigende Datenmenge sollte außerdem eine Steigerung der Autonomie des Multiagentensystems hinsichtlich der Verarbeitung und Auswertung der erfassten Messdaten angestrebt werden. Sinnvoll erscheint im Besonderen die Ausstattung der einzelnen Agenten mit maschinell ausführbaren Verfahren zur Schadenserkennung und -bewertung. Voraussetzung hierfür ist jedoch die Fortentwicklung der bestehenden Ansätze, da die zurzeit verwendeten Ansätze, insbesondere die schwingungsbasierten Ansätze, zwar prinzipiell auf den Einsatz von Computern zugeschnitten sind, jedoch einen hohen manuellen Aufwand bei der Erstellung und fortlaufenden Aktualisierung der erforderlichen Strukturmodelle erfordern. Eine interessante Perspektive für zukünftige Arbeiten stellen deshalb modellfreie Verfahren dar, die unter Nutzung von Methoden der statistischen Mustererkennung und des Data Minings eine Extraktion des charakteristischen Bauwerksverhaltens erlauben. Die entwickelten Verfahren können dann von den Agenten selbsttätig ausgeführt und als Berechnungsgrundlage für weiterführende Analysen verwendet werden, um die Diagnose des aktuellen Bauwerkszustandes für die Beteiligten weiter zu vereinfachen und die Schadensprävention mittelfristig proaktiver zu gestalten.

Teil IV

Anhang

Anhang A

Datenlogger

Dieser Anhang soll einen kurzen Überblick über Datenlogger geben. Der Inhalt des Anhangs wurde in großen Teilen der Diplomarbeit [Mittrup 02] entnommen.

A.1 Definition

Datenlogger sind elektronische Geräte zur Erfassung von Betriebs- und Umweltdaten. Sie übernehmen selbstständig verschiedenste Messaufgaben. Die Spanne der erhältlichen Logger reicht dabei von einfachen Geräten mit begrenztem Leistungsumfang bis zu mikroprozessorgesteuerten Geräten, die neben Messaufgaben vielfältige Steuerungs- und Regelungsaufgaben übernehmen können. Typische Anwendungsgebiete für Datenlogger sind:

- Prozessüberwachung,
- Maschinenüberwachung,
- Transportüberwachung,
- Verkehrsüberwachung,
- Umweltüberwachung,
- Bauwerksüberwachung,
- Materialtest und
- Fahrzeugtest.

Eine grundlegende Definition eines Datenloggers sieht folgendermaßen aus:

> *„Datenlogger führen in bestimmten Zeitabständen Sensormessungen durch und speichern die Messergebnisse im internen Speicher.“*

Damit ergibt sich folgender Mindestfunktionsumfang:

1. Interne Zeitmessung und -steuerung für mindestens ein Messprogramm,
2. Anschlussmöglichkeiten für mindestens einen Sensor,
3. Vorhalten eines internen Speicher,
4. Schnittstelle für den Datentransfer und die Administration des Gerätes von einem externen Rechner aus.

Der beschriebene Mindestfunktionsumfang und die daraus abzuleitenden Funktionalitäten stellen die Mindestanforderungen an einen Datenlogger dar.

A.2 Analyse der Funktionalitäten eines Datenloggers

Die Funktionalitäten eines Datenloggers korrespondieren mit seiner Ausstattung. Die Analyse der Funktionalitäten erfolgt deshalb auf der Basis des oben beschriebenen Mindestfunktionsumfangs eines Datenloggers.

A.2.1 Interne Zeitmessung und -steuerung

Die zeitliche Steuerung von Sensorabfragen hat eine herausragende Bedeutung für alle Überwachungsprozesse. Ein Überwachungsprozess ist als die periodische Erfassung von Messwerten zu definieren. Die gesammelten Daten müssen möglichst transparent sein. Dazu gehört die Echtzeitstempelung der Messwerte genauso wie die eindeutige Identifikation des Wertes über das Messprogramm, den Sensornamen und die Einheit der Messung.

Die Abfrage von Sensoren wird gewöhnlich über ein oder mehrere Messprogramme Loggerintern realisiert. Für ein solches Messprogramm wird eine Liste von abzufragenden Sensoren und das Zeitintervall, in dem die Messungen stattfinden sollen, definiert. Nach Übertragung dieses Programms auf den Logger führt das Gerät die Messungen selbstständig und ohne eine Endbedingung durch. Der interne Speicher arbeitet dabei zumeist als Ringspeicher. Eine unregelmäßige bzw. ereignisgesteuerte Abfrage von Sensoren ist nicht oder nur bei leistungsfähigen Loggern möglich. Soll beispielweise eine Messreihe verdichtet werden, muss das Programm vom externen Rechner neu konfiguriert werden. Die Echtzeitstempelung der Messwerte gehört zur Standardausstattung jedes Datenloggers. Fast alle Datenlogger bieten die Möglichkeit, einen Zeitstempel benutzerdefiniert zu formatieren.

A.2.2 Anschlussmöglichkeiten für Sensoren

Jeder Datenlogger besitzt entweder mindestens einen internen Sensor oder Anschlussmöglichkeiten für mindestens einen Sensor. Einfache Geräte haben i.d.R. einen oder mehrere interne Sensoren. Leistungsfähigere Geräte besitzen dagegen Anschlussmöglichkeiten für unterschiedlichste, externe Sensoren und bieten damit eine höhere messtechnische Flexibilität.

Die angeschlossenen Sensoren arbeiten gewöhnlich elektrisch, d.h. der Logger sendet einen elektrischen Impuls an den Sensor und misst den Widerstand, die Spannung oder die Frequenz. Die gemessenen Werte werden anschließend skaliert und in ein bestimmtes Format gebracht. Die Skalierung der gemessenen Werte erfolgt oftmals nicht automatisch, mitunter auch aus dem Grund, dass angeschlossene Sensoren vor dem Messbetrieb geeicht werden müssen. Die automatische Skalierung wird deshalb nicht zur Mindestausstattung eines Datenloggers gezählt.

A.2.3 Interner Speicher

Der interne Speicher selbst unterliegt keinen Beschränkungen. Er ist i.d.R. als RAM-Speicher ausgeführt. Die Größe des Speichers variiert dabei sehr stark. Neuere Datenlogger erlauben bereits die Erweiterung des Speichers mit PCMCIA-Speicherkarten.

Daneben bedingt die Verwaltung von Messdaten eine zusätzliche Funktionalitäten. Die Daten müssen vom Speicher auf den externen Rechner transferiert und vorher ggfs. formatiert werden können. Darüber hinaus müssen nicht benötigte Daten aus dem Speicher gelöscht werden können.

A.2.4 Schnittstelle zum externen Rechner

Der Datentransfer und die Administration eines Datenloggers muss über eine gemeinsame Hardware-Schnittstelle des Datenloggers und des angeschlossenen Rechners erfolgen. Zur Standardausstattung eines aktuellen Rechners gehören serielle, parallele und USB-Schnittstellen, Datenlogger unterstützen aber zumeist nur die serielle Schnittstelle. Die Schnittstellenparameter müssen u.U. dem verwendeten Datenlogger angepasst werden.

Die Schnittstelle selbst besitzt keine weitere Funktionalität und dient allein als Kommunikationsbrücke. Messdaten können in Abhängigkeit von der Logger-internen Datenrepräsentation im ASCII-Format oder in binärer Form gesendet werden.

A.3 Datenlogger DataTaker DT600

Der Datenlogger DataTaker DT600 ist ein mikroprozessorgesteuerter Datenlogger mit umfangreichen Funktionen. Das Gerät gehört zu einer sehr verbreiteten Modellgruppe und kann durchaus als Referenzmodell für moderne, leistungsfähige Datenlogger betrachtet werden. Zum Leistungsumfang des DT600 gehören u.a. [Datataker Crew 01]:

- Anschlüsse für max. 40 Sensoren (mit Erweiterungsmodulen bis zu 120 Sensoren),
- Sofortabfrage eines oder mehrerer Sensoren,
- Zeitgesteuertes Abfragen in Intervallen von 1 Sekunde, 1 Minute, 1 Stunde oder 1 Tag bis zu mehreren Monaten,
- Alarmgesteuertes Abfragen von Sensoren und Änderung des Abfrageprogramms von Sensoren,
- 4 interne Programme zur Abfrage von Sensoren, ein Programm für die direkte Abfrage von Sensoren von einem externen Rechner aus,
- 20 Alarme,
- Linearisierung der Sensoren über 20 vom Anwender definierbare Gleichungen und lineare Stützkurven,
- Ausgabe der Messdaten im ASCII-Format,
- die Möglichkeit zur Programmierung des Loggers über einen kompletten Befehlssatz,
- Statistische Datenauswertung (u.a. Integral, Standardabweichung),
- Interner, Akku-gepufferter Speicher für 13650 Messwerte (64 kB),
- Erweiterung des Speichers durch PCMCIA-Speicherkarte auf bis zu 340000 Messwerte (1MB),
- Interne Echtzeituhr,

- RS 232 Schnittstelle (serielle Schnittstelle) zur Kommunikation mit einem externen Rechner,
- Betrieb von bis zu 32 Datenlogger dieses Typs durch einen Steuerrechner.

An dieser Stelle sei nur kurz darauf hingewiesen, das der DataTaker DT600 auch für komplexe Steuerungs- und Regelungsaufgaben geeignet ist. Durch die Kombination von Alarmen und Abfrageprogrammen ist eine alarm- und ereignisgesteuerte Überwachung beliebiger Vorgänge oder Prozesse möglich. Dabei können unterschiedlichste Sensoren von konventionellen Temperaturmessgebern über Schwingsaitensensoren bis hin zu Dehnungsmessstreifen an den Logger angeschlossen werden.

Anhang B

Angewendete Analyseverfahren

Im Folgenden wird ein Überblick über die in dieser Arbeit zur Auswertung von Messdaten angewendeten Verfahren gegeben. Hierbei handelt es sich vorwiegend um statistische Kenngrößen und Testverfahren, die für eine computerbasierte Auswertung der Bauwerksphänomene geeignet sind.

B.1 Statistische Kenngrößen und Testverfahren

B.1.1 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse hat das Ziel, einen funktionalen Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer oder mehrerer unabhängigen Variablen zu bestimmen. In der Talsperrenüberwachung wird die Regressionsanalyse häufig angewendet, um den Einfluss einer oder mehrerer unabhängiger Messgrößen $x_1, x_2, \ldots, x_p$ (z.B. Temperatur, Niederschlag, etc.) auf eine abhängige Größe y (z.B. Verformung) abzuschätzen. Das lineare Regressionsmodell hat folgende Form:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_p x_p + \epsilon \tag{B.1}$$

Darin wird y als abhängige Größe oder Regressand, x_i als unabhängige Grö0ße, Einflussgröße oder Regressor und β_i als Regressionskoeffizient bezeichnet.

B.1.2 Korrelation

Der Zusammenhang zwischen zwei oder mehr Variablen lässt sich durch eine Korrelationsanalyse bestimmen. Eine Schätzung des linearen Zusammenhang liefert der *Pearson sche Korrelationskoeffizient*:

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} \tag{B.2}$$

Dabei ist

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y}) \tag{B.3}$$

die *(empirische) Kovarianz*.

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}, \tag{B.4}$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2} \tag{B.5}$$

sind die (empirischen) Standardabweichungen und $\overline{x}, \overline{y}$ die arithmetischen Mittelwerte der x_i bzw. der y_i-Werte.

B.1.3 k-means-Clusteranalyse

Die k-means-Clusteranalyse ist eine Methode der Clusteranalyse, die das Ziel hat, n Beobachtungen in k Cluster zu unterteilen, wobei jede Beobachtungen zu dem Cluster mit dem nächstliegenden Mittelwert gehört.

Für eine gegebene Menge von Beobachtungen $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_n)$, in der jede Beobachtung ein d-dimensionaler reellwertiger Vektor ist, unterteilt k-means die n Beobachtungen in k Mengen $(k < n)$ $\mathbf{S} = \{S_1, S_2, \ldots, S_k\}$, um danach die Summe der Quadrate innerhalb des Clusters zu minimieren:

$$\arg\min_{\mathbf{S}} \sum_{i=0}^{k} \sum_{\mathbf{x}_j \in S_i} \|\mathbf{x}_j - \boldsymbol{\mu}_i\| \tag{B.6}$$

Darin ist $\boldsymbol{\mu}_i$ der Mittelwert von S_i.

Bei einer gegebenen Anfangsmenge von k Mittelwerten $\mathbf{m}_1^{(1)}, \ldots, \mathbf{m}_k^{(1)}$, die zufällig oder durch eine Heuristik ermittelt werden können, läuft der k-means-Algorithmus in zwei Schritten ab:

Zuweisungsschritt Weise jede Beobachtung dem Cluster mit den nächsten Mittelwert zu (d.h. unterteile die Beobachtungen nach dem Voronoi-Diagramm, das durch die Mittelwerte erzeugt wird).

$$S_i^{(t)} = \{\mathbf{x}_j : \|\mathbf{x}_j - \mathbf{m}_{i^*}^{(t)}\| \leq \|\mathbf{x}_j - \mathbf{m}_{i^*}^{(t)}\| \; \forall \, i^* = 1, \ldots, k\} \tag{B.7}$$

Aktualisierungsschritt Berechne für jedes Cluster die neuen Mittelwerte. Diese bilden die Zentren der Beobachtungen in dem Cluster.

$$\mathbf{m}_i^{t+1} = \frac{1}{|S_i^{(t)}|} \sum_{\mathbf{x}_j \in S_i^{(t)}} \mathbf{x}_j \tag{B.8}$$

Der Algorithmus konvergiert, wenn die Zuweisungen sich nicht mehr ändern.

B.1.4 Mann-Kendall-Test

Die Voraussetzung normalverteilter Daten ist bei Messdaten aus der Talsperrenüberwachung häufig nicht erfüllt. Zur Erkennung von Trends in normal- sowie nicht normalverteilten Daten ist der verteilungsfreie Mann-Kendall-Test geeignet. Der Test zerlegt hierzu eine gegebene Zeitreihe $y_t, t = 1, \ldots, N$ in 2 Teilreihen $y_{t'}, t' = 1, \ldots, N-1$ und $y_t, t = t'+1, t'+2, \ldots, N$ und vergleicht diese Teilreihen elementweise:

$$z_k = \begin{cases} 1 & \text{für} \quad y_t > y_{t'} \\ 0 & \text{für} \quad y_t = y_{t'} \\ -1 & \text{für} \quad y_t < y_{t'} \end{cases} \tag{B.9}$$

mit $k = (t' - 1)(2N - t')/2 + (t - t')$

Die Mann-Kendall-Statistik ergibt sich mit diesem Schema nach Gleichung B.10:

$$S = \sum_{t'=1}^{N-1} \sum_{t=t'+1}^{N} z_k \tag{B.10}$$

Die Teststatistik wird geführt nach Gleichung B.11

$$u_c = \begin{cases} 0 & \text{für} \quad S = 0 \\ \dfrac{(S+m)}{\sqrt{V(s)}} & \text{für} \quad sonst \end{cases} \tag{B.11}$$

mit $V(s) = \dfrac{1}{18} N(N-1)(2N+5)$
und $m = 1$für $\quad S < 0$
$m = -1$für $\quad S > 0$

Ist u_c größer als die $1 - \alpha/2$-Quantile der Standardnormalverteilung, kann ein Trend nicht widerlegt werden:

$$|u_c| > u_{1-\alpha/2} \tag{B.12}$$

B.1.5 Mann-Whitney-Test

Der verteilungsfreie U-Test nach Mann, Whitney und Wilcoxon zerlegt eine gegebene Zeitreihe $y_t, t = 1, \ldots, N$ zunächst in zwei Teilreihen $y_1, \ldots, y_m$ und $y_{m+1}, \ldots, N$ mit den Teilumfängen m und n, wobei gilt $N = m + n$. Die Mittelwerte der beiden Teilreihen werden dann anhand der Rangzahlen verglichen. Die Ursprungsdaten werden dazu in aufsteigender Folge geordnet und in der Reihe $z_t, t = 1, \ldots, N$ abgelegt und der Rang $R(y_t)$ der Beobachtung y_t in der Reihe z_t berechnet. Bei gleich großen Rangzahlen ist das Mittel aus den Rangzahlen zu bilden (vgl. Gleichung B.16). Die Testgröße u_c wird berechnet:

$$u_c = \frac{W - m(N+1)/2}{\sqrt{Var(W)}} \tag{B.13}$$

mit

$$W = \sum_{t=1}^{n} R(y_t) \tag{B.14}$$

und

$$Var(W) = mn(N+1)/12 \tag{B.15}$$

Es ist zu beachten, dass bei Autreten von Bindungen, d.h. bei gleichen Rangzahlen, die Varianz von W verringert werden muss:

$$Var(W) = \frac{mn}{12} \left(N + 1 - \frac{1}{N(N+1)} \sum_{i=1}^{g} (t_i^3 - t_i) \right) \tag{B.16}$$

mit g = Anzahl der Gruppen gleicher Werte
t_i = Häufigkeit innerhalb der Gruppe

B.1.6 Chow-Test

Aufbauend auf einem linearen Regressionsmodell wird beim Chow-Test ein gegebene Zeitreihe auf einen potentiellen Strukturbruch untersucht. Dazu wird die Gesamtreihe zunächst an einer bekannten oder angenommenen Bruchstelle in zwei Teilreihen zerlegt. Für die Teilreihen wird jeweils ein lineares Regressionsmodell erstellt und dieses mit einem Regressionsmodell für die Gesamtreihe verglichen.

Das Regressionsmodell für k Variablen hat die Form:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_k + \epsilon \tag{B.17}$$

Für die Teilreihen werden zwei getrennte Modelle Y_1 und Y_2 der Länge n_1 und n_2 erstellt:

$$Y_1 = \beta_{10} + \beta_{11} X_1 + \beta_{12} X_2 + \ldots + \beta_{1k} + \epsilon_1 \tag{B.18}$$

$$Y_1 = \beta_{20} + \beta_{21} X_1 + \beta_{22} X_2 + \ldots + \beta_{2k} + \epsilon_2 \tag{B.19}$$

Die Teststatistik wird berechnet zu:

$$F_{chow} = \frac{\frac{1}{k}\left(\sum_{i=1}^{n} \epsilon_i^2 - \sum_{i=1}^{n_1} \epsilon_{1i}^2 - \sum_{i=1}^{n_2} \epsilon_{2i}^2\right)}{\frac{1}{n_1 + n_2 - 2k}\left(\sum_{i=1}^{n_1} \epsilon_{1i}^2 + \sum_{i=1}^{n_2} \epsilon_{2i}^2\right)} \tag{B.20}$$

Ist F_{chow} größer als die $1 - \alpha/2$ -Quantile der F-Verteilung mit k und $n_1 + n_2 - 2k$ Freiheitsgraden, kann die Nullhypothese nicht verworfen werden und es liegt ein Sprung vor:

$$|F_{chow}| > F_{1-\alpha/2}(k, n_1 + n_2 - 2k) \tag{B.21}$$

Anhang C

Artefakte und Modelle aus der Analyse- und Entwurfsphase

C.1 Anwendungsfälle

Im Folgenden werden die Anwendungsfälle beschrieben, die der Konzeption des Multiagentensystems zugrunde gelegt wurden. Die Beschreibung basiert auf der in [Larman 05] beschriebenen formalen Darstellung.

C.1.1 Anwendungsfall AF1: Bauwerksphänomene erfassen

Anwendungsfall AF1: „Bauwerksphänomene erfassen“
Eine der wichtigsten Funktionalitäten des zu entwickelnden Bauwerksmonitoringsystems besteht in der automatisierten Erfassung von Bauwerksphänomenen. Da die Durchführung des physikalischen Messvorgangs durch den Einsatz von Mess- und Datenerfassungssystemen weitgehend automatisiert ist, gilt es für die Nutzer einen Fernzugriff auf die Hardwarekomponenten zu realisieren. Die Nutzer konfigurieren dabei primär die in situ installierten Mess- und Datenerfassungssysteme; die Erfassung erfolgt danach autonom auf der Basis der Gerätekonfiguration. Die Datenerfassungssysteme sollen deshalb über das Multiagentensystem zugreifbar und steuerbar sein. An diesem Anwendungsfall sind die für die Steuerung der Datenerfassungssysteme autorisierten Systemnutzer wie der Monitoringexperte, der Bauwerksbetreiber und ggfs. der Statiker beteiligt.

Anwendungsfall AF1: Bauwerksphänomene erfassen
Umfang: Bauwerksmonitoringsystem
Ebene: Anwenderziel
Primärakteur: Monitoringexperte
Akteur und Interessen:
Monitoringexperte: Will Bauwerksphänomene automatisiert erfassen lassen
Standardablauf:
1. Monitoringexperte hat ein Bauwerk, an dem Bauwerksphänomene auf Basis in situ installierter DAQ-Systeme erfasst werden sollen
2. Monitoringexperte startet System
3. Monitoringexperte sucht im System nach Sensoren und DAQ-Systemen
4. System zeigt registrierte Sensoren und DAQ-Systeme an
5. Monitoringexperte wählt DAQ-System aus
6. System kommuniziert mit DAQ-System
7. System zeigt Konfiguration an
8. Monitoringexperte bearbeitet Konfiguration des DAQ-Systems
9. System speichert Konfiguration und überträgt diese auf DAQ-System
10. DAQ-System erfasst Bauwerksphänomene auf Basis der neuen Konfiguration
Erweiterungen/Alternative Abläufe:
keine
Spezielle Anforderungen:
Interaktion mit in situ installierten DAQ-Systemen

C.1.2 Anwendungsfall AF2: Messdaten ansehen

Anwendungsfall AF2: „Messdaten ansehen“

Die Monitoringbeteiligten wollen die erfassten Messdaten ansehen. Die Messdaten können hierbei in einer Datenbank gespeichert sein oder — im Fall von Onlinedaten — direkt von den Datenerfassungssystemen geliefert werden. Zur Ansicht/Plausibilitätskontrolle werden die Messdaten von den Überwachungsbeteiligten üblicherweise in Tabellen- oder Diagrammform aufbereitet.

Bei der Ansicht von Onlinedaten reicht häufig eine vereinfachte, statische Darstellung, die wenige aktuelle Werte enthält.

Anwendungsfall AF2: Messdaten ansehen
Umfang: Bauwerksmonitoringsystem
Ebene: Anwenderziel
Primärakteur: Monitoringexperte
Akteur und Interessen:
Monitoringexperte: Will Messdaten ansehen
Statiker: Will Messdaten ansehen
Bauwerksbesitzer/-betreiber: Will Messdaten ansehen
Standardablauf:
1. Monitoringexperte will erfasste Messwerte ansehen
2. Monitoringexperte startet System
3. System zeigt registrierte Sensoren/Messstellen an
4. Monitoringexperte wählt Sensor aus
5. System zeigt Messwerte an
Erweiterungen/Alternative Abläufe:
a. Onlinedaten ansehen: 1. Monitoringexperte sucht im System nach Sensoren und DAQ-Systemen 2. System zeigt registrierte Sensoren und DAQ-Systeme an 3. Monitoringexperte wählt DAQ-System aus 4. System kommuniziert mit DAQ-System 5. System zeigt aktuelle Sensorwerte an
Spezielle Anforderungen:
Interaktion mit in situ installierten DAQ-Systemen, Interaktion mit Datenbanken

C.1.3 Anwendungsfall AF3: Messdaten importieren

Anwendungsfall AF3: „Messdaten importieren“

Das Bauwerksmonitoring kann häufig nicht vollständig automatisiert werden, da nicht alle Messungen bzw. Geräte (wirtschaftlich) automatisiert werden können. Aus einer manuellen oder halbautomatisierten Erfassung stammende Daten müssen dann von den Monitoringbeteiligten in das System importiert und zur Weiterverarbeitung in ein Zielformat umgewandelt werden. Die Messdaten liegen in Dateiform vor.

Anwendungsfall AF3: Messdaten importieren
Umfang: Bauwerksmonitoringsystem
Ebene: Anwenderziel
Primärakteur: Monitoringexperte
Akteur und Interessen:
Monitoringexperte: Will Messdaten importieren
Statiker: Will Messdaten importieren
Bauwerksbesitzer/-betreiber: Will Messdaten importieren
Standardablauf:
1. Monitoringexperte will Messwerte aus Datei importieren
2. Monitoringexperte startet System
3. System zeigt Dialog für den Dateiimport an
4. Monitoringexperte wählt Datei aus
5. System wandelt die Messwerte um
6. System speichert Messwerte im Zielformat
Erweiterungen/Alternative Abläufe:
keine
Spezielle Anforderungen:
Zugriff auf Datenbanken

C.1.4 Anwendungsfall AF4: Messdaten archivieren

Anwendungsfall AF4: „Messdaten archivieren“

Die erhobenen Messdaten müssen im Fall des Bauwerksmonitorings über einen langen Zeitraum, im Idealfall über die gesamte Lebensdauer des Bauwerks, archiviert werden. In der Langzeitüberwachung von Bauwerken ist deshalb die zuverlässige Datenarchivierung von besonderer Bedeutung. Messdaten müssen eindeutig identifizierbar sein und alle relevanten Informationen, insbesondere Metadaten zur Messung, enthalten. Messdaten müssen für alle Beteiligte verfügbar sein und Änderungen an den Messdaten protokolliert werden.

Anwendungsfall AF4: Messdaten archivieren
Umfang: Bauwerksmonitoringsystem
Ebene: Anwenderziel
Primärakteur: Monitoringexperte
Akteur und Interessen:
Monitoringexperte: Will Messdaten langfristig speichern
Statiker: Will Messdaten langfristig speichern
Bauwerksbesitzer/-betreiber: Will Messdaten langfristig speichern
Standardablauf:
1. Monitoringexperte hat Messwerte, die gespeichert werden sollen
2. Monitoringexperte startet System
3. Monitoringexperte gibt Messwerte ein
4. System speichert Messwerte
Erweiterungen/Alternative Abläufe:
a. Monitoringexperte lädt Messwerte in Dateiform in System
b. Datenverarbeitungsagent übergibt Messwerte an System
Spezielle Anforderungen:
Änderungen an Messwerten (Beobachtungen) müssen mit Datum und Bearbeiter protokolliert werden

C.1.5 Anwendungsfall AF5: Messdaten verwalten

Anwendungsfall AF5: „Messdaten verwalten“

Die Nutzer des Bauwerksmonitoringsystems verwalten die Messdaten nach ihrer Erfassung, wobei Messwerte gelesen, bearbeitet und gelöscht werden. Hierzu wählt der Nutzer die zu bearbeitenden Messwerte aus und editiert diese einzeln oder gruppenweise. An diesem Anwendungsfall sind alle Systemnutzer beteiligt, die Messdaten lesen und/oder bearbeiten dürfen.

Anwendungsfall AF5: Messdaten verwalten
Umfang: Bauwerksmonitoringsystem
Ebene: Anwenderziel
Primärakteur: Monitoringexperte
Akteur und Interessen:
Monitoringexperte: Will Messdaten verwalten
Statiker: Will Messdaten verwalten
Bauwerksbesitzer/-betreiber: Will Messdaten verwalten
Standardablauf:
1. Monitoringexperte hat Messdaten, die er/sie bearbeiten möchte
2. System zeigt Messwerte zur Bearbeitung an
3. Monitoringexperte wählt Messwerte aus
4. Monitoringexperte bearbeitet Messwerte
5. System speichert Messwerte
Erweiterungen/Alternative Abläufe:
a. Monitoringexperte löscht Messdaten
Spezielle Anforderungen:
Änderungen an Messwerten müssen mit Datum und Bearbeiter protokolliert werden
Bearbeitung soll interaktiv erfolgen

C.1.6 Anwendungsfall AF6: Messdaten grafisch aufbereiten

Anwendungsfall AF6: „Messdaten grafisch aufbereiten“

Durch die automatisierte Erfassung von Messwerten kann eine große Datenmenge entstehen, die gezielt gefiltert und aufbereitet werden muss, um von den Überwachungsbeteiligten sinnvoll ausgewertet werden zu können. Die Überwachungsbeteiligten bereiten die Messdaten üblicherweise zur leichteren Auswertung in grafischer Form auf. Die Visualisierung von Messdaten erfolgt dabei in Form von Punkt-, Streu-, Linien- Säulendiagrammen. Das Bauwerksmonitoringsystem soll deshalb eine Visualisierung von Messdaten sowohl in Berichts- als auch in Diagrammform über die grafische Benutzungsschnittstelle des Monitoringsystems ermöglichen. Alternativ können Berichte auf der Basis einer Vorlage automatisch vom System erstellt (befüllt) werden. Alle Überwachungsbeteiligte, die Messdaten auswerten, sind in diesen Anwendungsfall involviert.

Anwendungsfall AF6: Messdaten grafisch aufbereiten
Umfang: Bauwerksmonitoringsystem
Ebene: Anwenderziel
Primärakteur: Monitoringexperte
Akteur und Interessen:
Monitoringexperte: Will Messwerte in Diagrammform aufbereiten
Statiker: Will Messwerte in Diagrammform aufbereiten
Bauwerksbesitzer/-betreiber: Will Messwerte in Diagrammform aufbereiten
Standardablauf:
1. Monitoringexperte hat Messwerte, die als Diagramm aufbereitet werden sollen
2. System zeigt Messwerte zur Auswahl an
3. Monitoringexperte wählt Messwerte und Diagrammart aus
4. System stellt Messwerte in Diagrammform dar
Erweiterungen/Alternative Abläufe:
a. Monitoringexperte exportiert/druckt Diagramme aus
b. System erstellt automatisch Bericht nach Vorlage
c. Aufbereitung soll interaktiv erfolgen können
Spezielle Anforderungen:
keine

C.1.7 Anwendungsfall AF7: Messdaten auswerten

Anwendungsfall AF7: „Messdaten auswerten“

Die erfassten Bauwerksphänomene werden von den Beteiligten ausgewertet, um das Bauwerk hinsichtlich der Tragfähigkeit und Sicherheit zu beurteilten. Zur Untersuchung von gemessenen Bauwerksphänomenen werden häufig einfache Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Varianz) berechnet und/oder Analysen der Messreihen durchgeführt. Zusätzlich werden Bauwerksphänomene häufig auf der Basis von Finite-Element-Modellen simuliert und mit den gemessenen Bauwerksphänomenen verglichen. Dieser Anwendungsfall schließt alle Überwachungsbeteiligten ein, die mit der Auswertung von Messdaten befasst sind.

Anwendungsfall AF7: Messdaten auswerten
Umfang: Bauwerksmonitoringsystem
Ebene: Anwenderziel
Primärakteur: Statiker
Akteur und Interessen:
Statiker: Will Messdaten auswerten
Monitoringexperte: Will Messdaten auswerten
Bauwerksbesitzer/-betreiber: Will Messdaten auswerten
Standardablauf:
1. Monitoringexperte möchte Messwerte auswerten
2. System zeigt Messwerte zur Auswertung an
3. Monitoringexperte wählt Messwerte aus
4. Monitoringexperte gibt Befehl/Operation ein
5. System führt Befehl/Operation aus
6. System zeigt Ergebnisse an
Erweiterungen/Alternative Abläufe:
keine
Spezielle Anforderungen:
Bearbeitung soll iterativ und interaktiv erfolgen, Statistische Verfahren müssen verfügbar sein, Ergebnisse sollen visualisiert werden

C.1.8 Anwendungsfall AF8: Messdaten extrahieren

Anwendungsfall AF8: „Messdaten extrahieren“

Die Messdaten liegen nach der Datenerfassung zunächst in Rohdatenform vor und müssen vor der Speicherung in das gewünschte Zieldatenformat gebracht werden. Das Multiagentensystem soll deshalb die Funktionalität besitzen, automatisiert erfasste Messwerte aus den Speichern der Datenerfassungssysteme oder aus Dateien zu extrahieren, die Messwerte umzuwandeln und in eine Zieldatenbank zu laden bzw. an anderer Stelle abzulegen. Dieser Anwendungsfall schließt keine menschlichen Überwachungsbeteiligten ein und wird von Agenten des Multiagentensystems automatisiert ausgeführt.

Anwendungsfall AF8: Messdaten extrahieren
Umfang: Bauwerksmonitoringsystem
Ebene: Subfunktion
Primärakteur: Agent Datenerfassung
Akteur und Interessen:
Agent Datenerfassung: Will Messwerte zur Weiterverarbeitung von Quelle zu Ziel transportieren
Agent Datenverarbeitung:
Standardablauf:
1. Messwerte liegen nach der Erfassung in Dateiform vor
2. System holt Datei von Quelle ab
3. System transportiert Datei zum Ziel
Erweiterungen/Alternative Abläufe:
a. Messdaten liegen in internem Speicher des DAQ-Systems vor
Spezielle Anforderungen:
Interaktion mit in situ installierten Datenerfassungssystemen, insbesondere Datenloggern

C.1.9 Anwendungsfall AF9: Rohdatenformate verarbeiten

Anwendungsfall AF9: „Rohdatenformate verarbeiten“
Messdaten aus Rohdatenformat verarbeiten und in Zieldatenformat bringen

Anwendungsfall AF8: Rohdatenformate verarbeiten
Umfang: Bauwerksmonitoringsystem **Ebene:** Subfunktion **Primärakteur:** Agent Datenverarbeitung **Akteur und Interessen:** **Agent Datenverarbeitung:** Will Messwerte aus Quelldatenformat in Zieldatenformat bringen **Standardablauf:** 1. Messwerte liegen in Quelldatenformat vor 2. System nimmt Messwerte entgegen 3. System erkennt das Quelldatenformat 4. System bringt Messwerte in Zieldatenformat 5. System leitet Messwerte zur Speicherung weiter **Erweiterungen/Alternative Abläufe:** keine **Spezielle Anforderungen:** keine

C.2 Verantwortlichkeiten

Tabelle C.1: Verantwortlichkeiten der Agententypen des Monitoringsystems

Agententyp	Verantwortlichkeiten
Sensorikagent	1. Kommuniziert mit DAQ-System. 2. Erfasst Bauwerksphänomene zeitgesteuert. 3. Liefert auf Anfrage gespeicherte Messdaten des DAQ-Systems. 4. Schreibt die Messwerte in eine Datei. 5. Liefert auf Anfrage den Speicherort der Messdatei. 6. Liefert auf Anfrage einen aktuellen Messwert des DAQ-Systems. 7. Liefert auf Anfrage techn. Informationen über das DAQ-System. 8. Überträgt auf Anfrage Kommando an DAQ-System. 9. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten.
Messdateiagent	1. Überwacht eine Messdatei. 2. Liest Messdatei zeitgesteuert aus. 3. Liefert auf Anfrage in der Datei gespeicherte Messdaten. 4. Liefert auf Anfrage Metainformationen über das DAQ-System. 5. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten.
Datenverteilungsagent	1. Arbeitet nach einem vorgegebenen Programm/Zeitplan. 2. Liest Messdaten ein. 3. Leitet die Messdaten zur Verarbeitung weiter. 4. Liefert auf Anfrage Informationen über das aktuelle Messprogramm. 5. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten.
Datenverarbeitungsagent	1. Nimmt erfasste Messdaten in verschiedenen Rohdatenformaten entgegen. 2. Erfragt das Rohdatenformat selbstständig. 3. Bringt die Messdaten in das Zieldatenformat. 4. Leitet die Messdaten zur Speicherung weiter. 5. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten.
Datenspeicherungsagent	1. Speichert/Verwaltet auf Anfrage die erfassten Messdaten in einer Datenbank. 2. Liefert auf Anfrage gespeicherte Messdaten. 3. Führt auf Anfrage Aktion auf Datenbank aus. 4. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten.
Berichtsagent	1. Holt Messdaten. 2. Erstellt selbstständig einen Messbericht. 3. Liefert auf Anfrage einen Messbericht. 4. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten.
Filteragent	1. Holt Messdaten. 2. Filtert Messdaten nach nutzerdefinierten Kriterien. 3. Informiert den Nutzer über das Ergebnis des Filterprozesses. 4. Liefert auf Anfrage eine Beschreibung des Filters.

Tabelle C.1: Verantwortlichkeiten der Agententypen des Monitoringsystems (Fortsetzung)

Agententyp	**Verantwortlichkeiten**
	5. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten.
Statistikagent	1. Kapselt statistische Funktionalitäten. 2. Führt auf Anfrage eine Berechnung/statistische Analyse durch. 3. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten.
Systemüberwachungs-agent	1. Nimmt die Registrierungen anderer Agenten entgegen. 2. Überwacht den Zustand anderer Agenten. 3. Informiert den Benutzer über ausgefallene Agenten. 4. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten.
Persönlicher Agent Systemnutzer	1. Präsentiert dem Benutzer alle dem System hinzugefügten Sensoren und Datenlogger. 2. Nimmt Benutzereingaben hinsichtlich der Sensor- bzw. Datenlogger entgegen. 3. Präsentiert dem Benutzer die gespeicherten Messdaten. 4. Nimmt Benutzereingaben hinsichtlich der gespeicherten Messdaten entgegen. 5. Präsentiert dem Benutzer die statistische Analyse. 6. Nimmt Benutzereingaben hinsichtlich der statistischen Analyse entgegen. 7. Fordert Berichte an. 8. Nimmt Ergebnisse des Filteragenten entgegen. 9. Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agenten. 10. Erkundigt sich beim Gelbe Seiten-Agenten nach anderen Agententypen.

C.3 Bekanntschaften

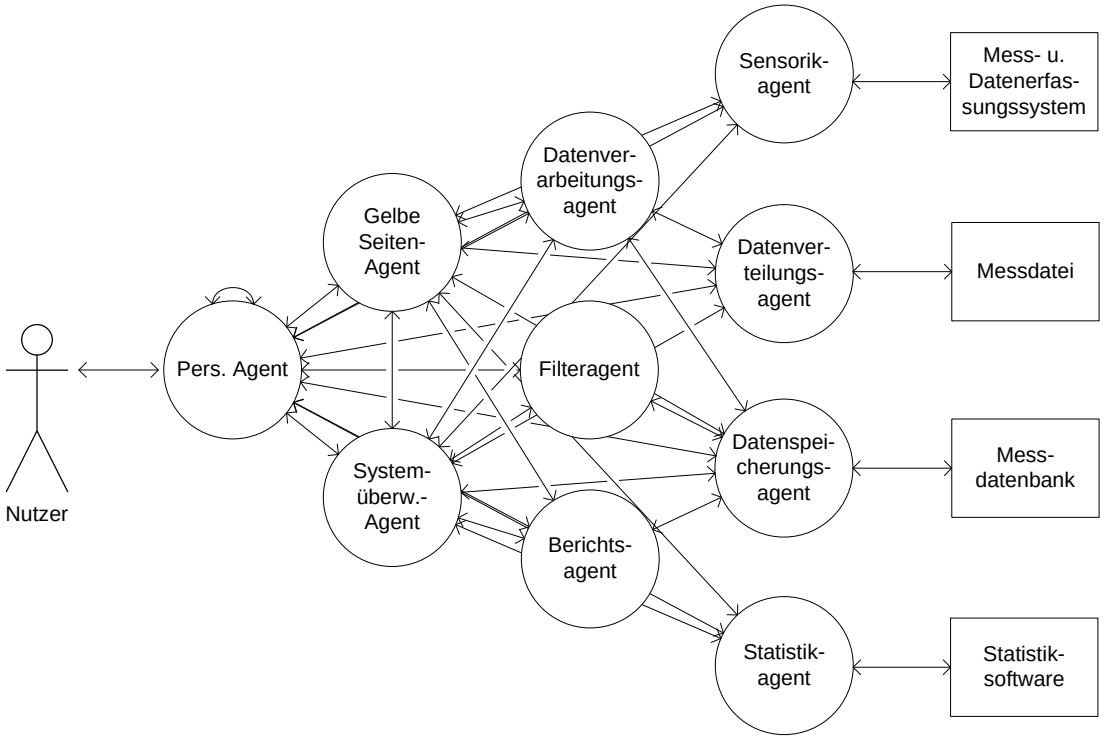


Abbildung C.1: Bekanntschaften zwischen den Agenten des Bauwerksmonitoringsystems (Bekanntschaftsdiagramm)

C.4 Interaktionstabellen

C.4.1 Sensorikagent

Interaktion	Verantw.	IP	Rolle	Mit	Wann
Beantworte Frage nach aktuellem Messwert	6	FIPA Request	R	Daten-verteilungsagent	Anfrage erhalten
Beantworte Anfrage, Beobachtungen zu holen	3	FIPA Request	R	Daten-verteilungsagent	Anfrage erhalten
Beantworte Anfrage, Speicherort zu holen	5	FIPA Request	R	Daten-verteilungsagent	Anfrage erhalten
Beantworte Anfrage, Geräteinfo zu holen	7	FIPA Request	R	Pers. Agent	Anfrage erhalten
Beantworte Anfrage, Kommandos zu übertragen	8	Query-Ref	R	Pers. Agent	Anfrage erhalten
Registriert sich beim DF-Agenten	9	FIPA Request	I	Gelbe Seiten-Agenten	Start des Agenten

C.4.2 Messdateiagent

Interaktion	Verantw.	IP	Rolle	Mit	Wann
Beantworte Anfrage, Beobachtungen zu holen	3	FIPA Request	R	Daten-verteilungsagent	Anfrage erhalten
Beantworte Anfrage, Metainformationen zu holen	4	FIPA Request	R	Pers. Agent	Anfrage erhalten
Registriert sich beim DF-Agenten	5	FIPA Request	I	Gelbe Seiten-Agenten	Start des Agenten

C.4.3 Datenverteilungsagent

Interaktion	Verantw.	IP	Rolle	Mit	Wann
Holt Messdaten	1	FIPA-Request	I	Sensorikagent	Interner Zeitplan
Leitet Messdaten weiter	2	FIPA-Request	I	Datenverarbeitungsagent	Messdaten geholt
Beantwortet Anfrage, Zeitplan zu senden	3	FIPA Request	R	Pers. Agent	Anfrage erhalten
Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agent	4	FIPA-Request	I	DF-Agent	Hochfahren/Start des Agenten

C.4.4 Datenverarbeitungsagent

Interaktion	Verantw.	IP	Rolle	Mit	Wann
Nimmt Messdaten entgegen	1	FIPA-Request	R	Datenverteilungsagent	Anfrage erhalten
Holt Informationen zum Datenformat	2	FIPA-Request	I	Sensorikagent	Messdaten empfangen
Leitet Messdaten zur Speicherung weiter	4	FIPA-Request	I	Datenspeicherungsagent	Messdaten umgewandelt
Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agent	5	FIPA-Request	I	DF-Agent	Hochfahren/Start des Agenten

C.4.5 Datenspeicherungsagent

Interaktion	Verantw.	IP	Rolle	Mit	Wann
Beantwortet Anfrage, Daten zu speichern/-verwalten	1	FIPA-Request	R	alle	Anfrage erhalten
Beantwortet Anfrage, Daten zu liefern	2	FIPA-Request	R	alle	Anfrage erhalten
Beantwortet Anfrage, Aktion auf Datenbank auszuführen	3	FIPA-Query	R	alle	Anfrage erhalten
Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agent	4	FIPA-Request	I	DF-Agent	Hochfahren/Start des Agenten

C.4.6 Berichtsagent

Interaktion	Verantw.	IP	Rolle	Mit	Wann
Holt Messdaten für Bericht	1	FIPA-Request	I	Daten-speicherungs-agent	Zeitplan
Beantwortet Anfrage, Bericht zu liefern	3	FIPA-Request	R	Pers. Agent	Anfrage erhalten
Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agent	4	FIPA-Request	I	DF-Agent	Hochfahren/Start des Agenten

C.4.7 Filteragent

Interaktion	Verantw.	IP	Rolle	Mit	Wann
Holt Messdaten	1	FIPA-Request	I	Daten-speicherungs-agent	Zeitplan
Informiert registrierte Agenten	3	FIPA-Request	I	Pers. Agent	Anfrage erhalten
Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agent	4	FIPA-Request	I	DF-Agent	Hochfahren/Start des Agenten

C.4.8 Statistikagent

Interaktion	Verantw.	IP	Rolle	Mit	Wann
Beantwortet Anfrage, Berechnung durchzu-führen	2	FIPA-Request	R	Pers. Agent	Anfrage erhalten
Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agent	3	FIPA-Request	I	DF-Agent	Hochfahren/Start des Agenten

C.4.9 Persönlicher Agent

Interaktion	Verantw.	IP	Rolle	Mit	Wann
Holt Sensorkonfiguration	2	FIPA-Request	R	Sensorikagent	Benutzerinteraktion
Sendet Sensorkonfiguration	3	FIPA-Request	I	Sensorikagent	Benutzerinteraktion
Fragt nach aktuellem Sensorwert	4	Query-Ref	I	Sensorikagent	Benutzerinteraktion
Holt Messdaten	5	FIPA-Request	I	Datenspeicherungsagent	Benutzerinteraktion
Sendet Messdaten zur Speicherung	6	FIPA-Request	I	Datenspeicherungsagent	Benutzerinteraktion
Sendet Messdaten zur Aktualisierung	7	FIPA-Request	I	Datenspeicherungsagent	Benutzerinteraktion
Sendet Messdaten zur Löschen	8	FIPA-Request	I	Datenspeicherungsagent	Benutzerinteraktion
Holt Messbericht	9	FIPA-Request	I	Berichtsagent	Benutzerinteraktion
Registriert sich beim Filteragenten	10	FIPA-Request	I	Filteragent	Benutzerinteraktion
Nimmt Nachricht entgegen	11	FIPA-Request	R	Filteragent	Anfrage erhalten
Erkundigt sich nach anderen Agenten	12	FIPA-Request	I	DF-Agent	Hochfahren/Start des Agenten
Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agent	13	FIPA-Request	I	DF-Agent	Hochfahren/Start des Agenten

C.4.10 Observer-Agent

Interaktion	Verantw.	IP	Rolle	Mit	Wann
Beantwortet Anfrage, Agenten zu registrieren	1	FIPA-Request	R	alle	Anfrage erhalten
Registriert sich beim Gelbe Seiten-Agent	4	FIPA-Request	I	DF-Agent	Hochfahren/Start des Agenten

C.5 Dienstbeschreibungen

C.5.1 Sensorikagent

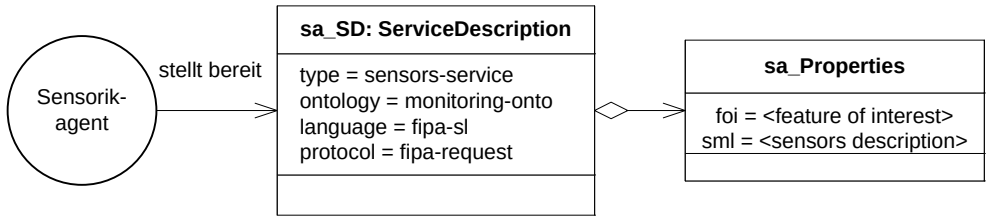


Abbildung C.2: Dienstbeschreibung des Sensorikagenten

C.5.2 Messdateiagent

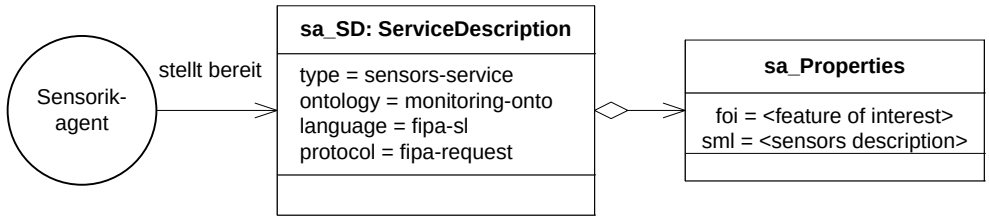


Abbildung C.3: Dienstbeschreibung des Messdateiagenten

C.5.3 Datenverteilungsagent

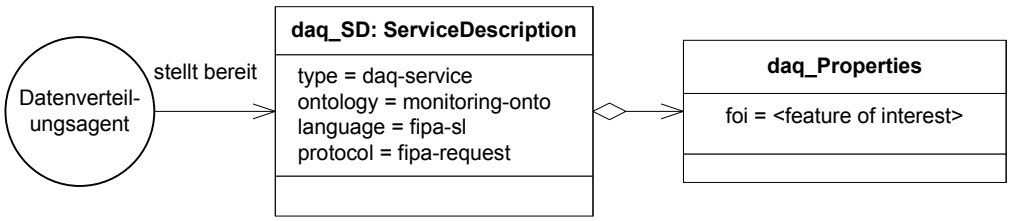


Abbildung C.4: Dienstbeschreibung des Datenverteilungsagenten

C.5.4 Datenverarbeitungsagent

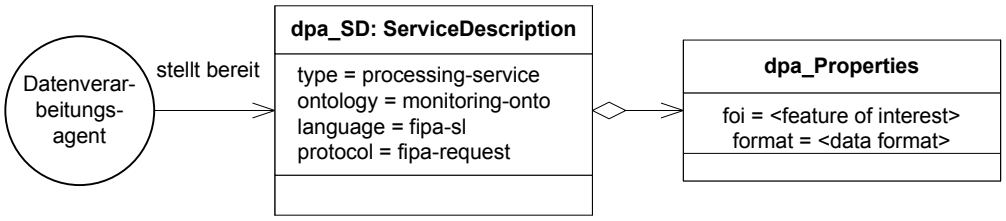


Abbildung C.5: Dienstbeschreibung des Datenverarbeitungsagenten

C.5.5 Statistikagent

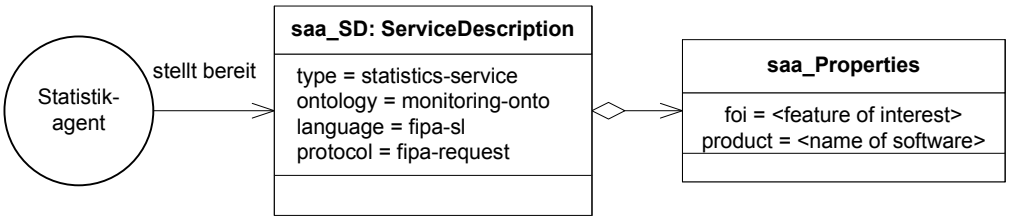


Abbildung C.6: Dienstbeschreibung des Statistikagenten

C.5.6 Datenspeicherungsagent

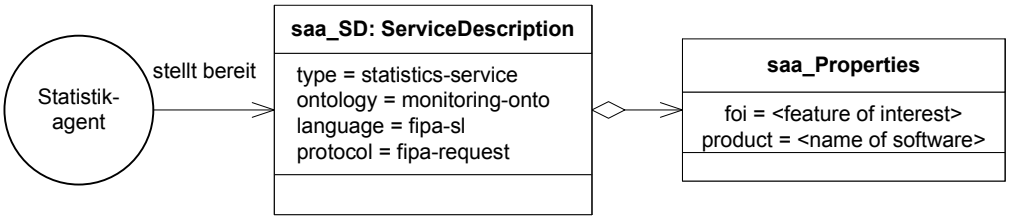


Abbildung C.7: Dienstbeschreibung des Datenspeicherungsagenten

C.5.7 Persönlicher Agent

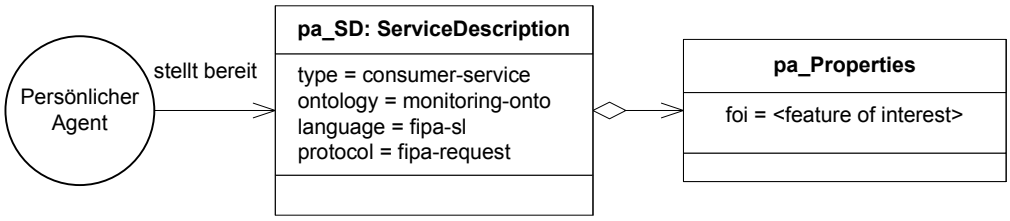


Abbildung C.8: Dienstbeschreibung des persönlichen Agenten

Literaturverzeichnis

[Adams 07] D. Adams. Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications. Wiley, 2007.

[Albert 03] M. Albert, T. Langle, H. Worn, M. Capobianco, A. Brighenti. Multi-agent systems for industrial diagnostics. Tagungsband: Proceedings of 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Band 3, Seiten 483 – 488, Washington, DC, 2003.

[Ammar 05] Y. Ammar, A. Buhrig, M. Marzencki, B. Charlot, S. Basrour, K. Matou, M. Renaudin. Wireless sensor network node with asynchronous architecture and vibration harvesting micro power generator. Tagungsband: Proceedings of the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence: innovative context-aware services: usages and technologies, Seiten 287 – 292, Grenoble, 2005. ACM.

[Ardito 05] R. Ardito, P. Bartalotta, L. Ceriani, G. Maier. Diagnostic inverse analysis of concrete dams with statical excitation. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 15(6):381–386, 2005.

[Austin 62] J. L. Austin. How to Do Things with Words. Harvard University Press, Cambridge, MA, USA, 1962.

[Balageas 06] D. Balageas, C.P. Fritzen, A. Güemes. Structural Health Monitoring. ISTE, 2006.

[BBC News 08] BBC News. Design blamed for US bridge fall. Nachricht vom 15. Januar 2008. `http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/americas/7190722.stm`. Online-Quelle, 2008.04.30.

[Beeby 07] S. Beeby. Vibes — vibration energy scavenging. `http://www.vibes.ecs.soton.ac.uk/index.html`. Online-Quelle, 2009.12.13.

[Beer 09] G. Beer, Hrsg. Technology Innovation in Underground Construction. CRC Press, October 2009. ISBN 978-0-415-55105-2.

[Bellifemine 07] F. Bellifemine, G. Caire, D. Greenwood. Developing Multi-Agent Systems wit JADE. Wiley Series in Agent Technology. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, England, 2007.

[Berga 06] L. Berga, Hrsg. Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the 21st Century: Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21st Century, Barcelona, Spain, 2006. International Comittee on Large Dams, Taylor & Francis.

[Bettzieche 02] V. Bettzieche. Vertiefte Analyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung. Wissenschaftliche Berichte. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida(FH),

2002.

[Bilek 06] J. Bilek. Vernetzt-kooperative Tragwerksplanung mit ingenieurspezifischen Softwareagenten. Doktorarbeit, Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2006.

[Bloch 04] M. Bloch. Entwicklung eines Software-Agenten zur Verwaltung komplexer Datenbestände aus dem Bauwesen. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2004.

[Böcker 05] D. Böcker. Statistische Analyse von Messdaten aus der Talsperrenüberwachung. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik, Ruhr-Universität Bochum, 2005.

[Bond 88] A. H. Bond, L. Gasser. An Analysis of Problems and Research in DAI. In A. H. Bond, L. Gasser, Hrsg., Readings in Distributed Artificial Intelligence, Seiten 3 – 35. Morgan Kaufmann, San Mateo, Kalifornien, 1988.

[Botts 07] M. Botts, A. Robin. OpenGIS Sensor Model Language (SensorML) Implementation Specification. OpenGIS Publicly Available Standard OGC 07-000, Open Geospatial Consortium, 2007.

[Bratman 87] M. Bratman. Intention, Plans, and Practical Reason. Harvard University Press, Cambridge, MA, USA, 1987.

[Braubach 05] L. Braubach, A. Pokahr, A. Walczak. Jadex beanynizer. `http://jadex.sourceforge.net/`. Online-Quelle, 2009.09.01.

[Brazier 95] F. Brazier, B. Dunin-Keplicz, N.R. Jennings, J. Treur. Formal specification of Multi-Agent Systems: a real-world case. Tagungsband: Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems, ICMAS, Band 95, Seiten 25–32, 1995.

[Brooks 85] R. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. In MIT AI Memo 864. MIT AI Lab, September 1985.

[Brooks 86] R. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. IEEE Journal of Robotics and Automation, 2(1):14 – 23, 1986.

[Brooks 91] R. Brooks. Intelligence without representation. Artificial Intelligence, 47(1 - 3):139 – 159, 1991.

[Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin 04] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin. ZfPBau - Kompendium – Verfahren der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen. `http://www.bam.de/microsites/zfp_kompendium/welcome.html`. Online-Quelle.

[Bussmann 92] S. Bussmann, J. Müller. A negotiation framework for co-operating agents. In S. M. Deen, Hrsg., Tagungsband: Proceedings of theCKBS-SIG, Seiten 1 – 17, Kelle, UK, 1992.

[Cherubim 05] C. Cherubim. Das 2-Stab-Modell - ein deterministisches Modell für temperaturbedingte Bewegungen der Krone von Gewichtsstaumauern. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, 29:591–605, 2005.

[Chouinard 06] L. Chouinard, V. Roy. Performance of statistical models for dam monitoring data. Tagungsband: Proc. of the 11th Int. Conference on Computing and Decision Making

in Civil and Building Engineering, Montréal, Kanada, Seiten 199 – 207, 2006.

[Codehaus 09] Codehaus. Groovy — An agile dynamic language for the Java Platform. `http://groovy.codehaus.org/`. Online-Quelle, 2009.12.10.

[Cohen 95] P. R. Cohen, H. J. Levesque. Communicative actions for artificial agents. In V. Lesser, L. Gasser, Hrsg., Tagungsband: Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS 95), San Francisco, USA, 1995. MIT Press.

[Datataker Crew 01] Datataker Crew. Benutzerhandbuch Datataker DT600. Datataker, 2001.

[De Sortis 07] A. De Sortis, P. Paoliani. Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring. Engineering Structures, 29(1):110 – 120, 2007.

[Deutsches Talsperrrenkomitee e.V. 07] Deutsches Talsperrrenkomitee e.V. Talsperren in Europa — Aufgaben und Herausforderungen. Tagungsband: 14. Deutsches Talsperrensymposium, 2007. `http://www.talsperrenkomitee.de/freising2007`.

[DIN 1076 99] DIN 1076. Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen - Überwachung und Prüfung. DIN 1076.

[DIN 19700 04] DIN 19700. Stauanlagen. DIN 19700.

[DVWK-Merkblatt 222 91] DVWK-Merkblatt 222. Meß- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen, Band 222 of DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft. Paul Parey, 1991. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK).

[DVWK-Merkblatt 231 95] DVWK-Merkblatt 231. Sicherheitsbericht Talsperren – Leitfaden, Band 231 of DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft. 1995.

[Farrar 00] C. R. Farrar, H. Sohn. Pattern recognition for structural health monitoring. Tagungsband: Workshop on Mitigation of Earthquake Disaster by Advanced Technologies, Las Vegas, USA, 2000.

[Farrar 99] C. R. Farrar, T. A. Duffey, W. Doebling, D. A. Nix. A statistical pattern recognition paradigm for vibration-based structural health monitoring. Tagungsband: 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, USA, 1999.

[Ferguson 91] I.A. Ferguson. Towards an architecture for adaptive, rational, mobile agents. In E. Werner, Y. Demazeau, Hrsg., Tagungsband: Decentralized AI 3 – Proceedings of the Third European Workshop on Modelling Autonomous Agents and Multi-Agent World, Seiten 249 – 262. Elsevier, Amsterdam, 1991.

[Ferry 58] S. Ferry, G. Willm. Méthodes d'analyse et de surveillance des déplacements observés par le moyen de pendules dans les barrages. Tagungsband: VIth International Congress on Large Dams, Band II, Seiten 1179 – 1201, New York, 1958. ICOLD.

[Finin 94] T. Finin, R. Fritzson, D. McKay, R. McEntire. KQML as an Agent Communication Language. In N. Adam, B. Bhargava, Y. Yesha, Hrsg., Tagungsband: Proceedings of the 3rd International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM), 456 – 463, Gaithersburg, MD, USA, 1994. ACM Press.

[FIPA 07] FIPA. Foundation for physical intelligent agents. `www.fipa.org`. Online-Quelle, 2009.01.27.

[Fowler 97] M. Fowler. Analysis patterns: reusable object models. Pearson Education, Upper Saddle River, USA, 1997. ISBN 0-201-89542-0.

[Frangopol 01] D. Frangopol, J. Kong, E Gharaibeh. Reliability-based life-cycle management of highway bridges. Journal of Computing in Civil Engineering, 15(1):27 – 33, 2001.

[Fraser 09] N. Fraser. google-diff-match-patch — diff, match, patch libraries for plain text. `http://code.google.com/p/google-diff-match-patch/`. Online-Quelle, 2009.12.14.

[Friebel 01] W.-D. Friebel. Bauwerksdaten und Bauwerksprüfung. Tagungsband: Fachtagung Bauwerksdiagnose 2001. DGZfP-Berichtsband, Band 76. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V., 2001.

[Garabedian 06] A. Garabedian, A. Bagchi, A. Joshi, J. Dong. Developing an intelligent system for modeling the dam behaviour based on statistical pattern matching of sensory data. Tagungsband: Proc. of the 11th Int. Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, Montréal, Kanada, Seiten 2457 – 2465, 2006.

[Genesereth 94] M.R. Genesereth, S. P. Ketchpel. Software agents. Communications of the ACM, 37(7):48 – 53, 1994.

[Georgeff 83] M. Georgeff. Communication and interaction in multi-agent planning. Tagungsband: Proceedings of the 3rd National Conference on Artificial Intelligence, Seiten 125 – 129, Washington, DC, USA, 1983.

[Georgeff 84] M. Georgeff. A theory of action for multi agent planning. Tagungsband: Proceedings of the 4th National Conference on Artificial Intelligence, Seiten 121 – 125, Austin, Texas, USA, 1984.

[Gockel 08] T. Gockel. Form der wissnschaftlichen Ausarbeitung. Springer-Verlag, Heidelberg, 2008. `www.formbuch.de`.

[Graversen 09] K. B. Graversen. Super csv. http://supercsv.sourceforge.net/. Online-Quelle, 2009.11.30.

[Greenwood 06] D. Greenwood, G. Vitaglione, L. Keller, M. Calisti. Service Level Agreement Management with Adaptive Coordination. Tagungsband: Proceedings of the International Conference on Networking and Services. IEEE Computer Society Washington, DC, USA, 2006.

[Grimmer 06] C. Grimmer. Hohe Schule – c't-Bots bewältigen komplexe Aufgaben. c't – Magazin für Computertechnik, 7:218 –, 2006.

[Gruber 93] T. R. Gruber. A translation approach to portable ontologies. Knowledge Acquisition, 5(2):199 – 220, 1993.

[Haardt 99] P. Haardt. Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von Brücken und Ingenieurbauwerken. Tagungsband: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Band Heft B 25, Bremerhaven, 1999. Wirtschaftsverlag NW.

[Hariri 04] K. Hariri. Bauwerksmonitoring und Messtechnik I. Vorlesungsmanuskript. 2009.08.13.

[Hartmann 01] D. Hartmann, V. Bettzieche. Agentenbasierte Überwachung sicherheitsrelevanter Ingenieurbauwerke, insbesondere Staubauwerke. Unveröffentlicher Projektantrag, DFG HA 1463.

[Hartmann 06] D. Hartmann, I. Mittrup, A. Marx. Agentenbasierte Überwachung sicherheitsrelevanter Ingenieurbauwerke, insbesondere Staubauwerke. Unveröffentlichter Abschlussbericht, DFG HA 1463.

[Hartmann 07] D. Hartmann, J. Bilek. Überblick zum Themenbereich Agentensysteme. In U. Rüppel, Hrsg., Vernetzt-kooperative Planungsprozesse im Konstruktiven Ingenieurbau: Grundlagen, Methoden, Anwendungen und Perspektiven zur vernetzten Ingenieurkooperation, Seiten 323 – 334. Springer-Verlag, 2007.

[Hejll 07] A. Hejll. Civil Structural Health Monitoring — Strategies, Methods and Applications. Ph. d. thesis, Division of Structural Engineering, Department of Civil and Mining Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Schweden, 2007.

[Hepp 98] P. Hepp. Moderne Leittechnik in der Talsperrenüberwachung. Wasser, Energie, Luft - Eau, Energie, Air, 90. Jahrgang, 1998. Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband.

[Holt 08] R. Holt, J. Hartmann. Adequacy of the U10 & L11 Gusset Plate Designs for the Minnesota Bridge No. 9340 (I-35W over the Mississippi River). Interim report, Federal Highway Administration, Turner-Fairbank Highway Research Center, 2008. `http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/pdfs/ntsb_design_adequacy_report.pdf`.

[Horlacher 02] H.-B. Horlacher, M. Standfuß, J. Kittler, U. Müller. Neue Aspekte bei der Auswertung von Überwachungsmessungen an Betonstaumauern in Sachsen. Tagungsband: III. Mitweidaer Talsperrentag, Wissenschaftliche Berichte. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH), Mittweida, Deutschland, 2002.

[Horstmann 01] C.S. Horstmann, G. Cornell. Core Java 2, Band 1 – Grundlagen. Markt + Technik Verlag, München, 2001.

[Horstmann 02] C. S. Horstmann, G. Cornell. Core Java 2, Band 2 – Expertenwissen. Markt+ Technik Verlag, München, 2002.

[Iglesias 98] C.A. Iglesias, M. Garijo, J.C. Gonzalez, J.R. Velasco. Analysis and design of multiagent systems using MAS-CommonKADS. Intelligent Agents IV, LNAI, 1365:313–326, 1998.

[ISHMII 08] ISHMII. International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. `http://www.ishmii.org`. Online-Quelle, 2008.04.30.

[ISIS 08] ISIS. ISIS Canada Research Network — Intelligent Sensing for Innovative Structures. `http://www.isiscanada.com/index.html`. Online-Quelle, 2008.09.10.

[JADE 08] JADE. Java Agent DEvelopment Framework. `http://jade.tilab.com/`. Online-Quelle, 2009.03.01.

[Jaspersoft Corporation 09] Jaspersoft Corporation. Jasper Reports — Embeddable open source Java reporting library. `http://jasperforge.org/projects/jasperreports`. Online-Quelle, 2009.12.02.

[Jennings 01] N.R. Jennings. An agent-based approach for building complex software systems. Communications of the ACM, 44(4):35–41, 2001.

[Jennings 94] N.R. Jennings. The ARCHON System and its Applications. Tagungsband: Prceedings of the 2nd International Working Conference on Cooperating Knowledge Based Systems (CKBS-94), Seiten 13 – 29, Dake Centre, University of Keele, UK, 1994.

[Jennings 99] N.R. Jennings, M. Wooldridge. Agent-oriented software engineering. Tagungsband: 9th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, MAAMAW 1999. Springer-Verlag, 1999.

[Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology 09] Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Semantic Web for Earth and Environmental Terminology (SWEET). `http://sweet.jpl.nasa.gov/ontology`. Online-Quelle, 2009.09.04.

[Klusch 01] M. Klusch. Information Agent Technology for the Internet: a Survey. Data Knowledge Engineering, 36(3):337 – 372, 2001.

[Krüger 04] G. Krüger. Handbuch der Java-Programmierung. Pearson Education Deutschland, 4. auflage Auflage, 2004.

[Krüger 06] M. Krüger, C. Große. Preiswerte Dauerüberwachung von Bauwerken mit drahtloser Sensorik. Tagungsband: Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, DGZfP Berichtsband, Berlin, 2006. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.

[Lanata 05] F. Lanata. Damage Detection Algorithms for continuous static monitoring of structures. Dissertation, Universität Genua, 2005.

[Larman 05] C. Larman. Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-oriented Analysis and Design and Iterative Development. Pearson Education, 3rd edition Auflage, 2005.

[Lehrstuhl für Rechnerorientierte Statistik und Datenanalyse 09] Lehrstuhl für Rechnerorientierte Statistik und Datenanalyse. Rserve — TCP/IP interface to R. `http://stats.math.uni-augsburg.de/rserve/`. Online-Quelle, 2009.12.08.

[Lei 03] Y. Lei, A.S. Kiremidjian, K. K. Nair, J.P. Lynch, K. H. Law, T.W. Kenny, E. Carryer, A. Kottapalli. Statistical damage detection using time series analysis on a structural health monitoring benchmark problem. Tagungsband: Proceedings of the 9th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, San Francisco, USA, 2003.

[Lücken 04] Th. Lücken. Zur Schadensanalyse von Stahl- und Spannbetonbrücken mit Fuzzy-Expertensystemen. Doktorarbeit, Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2004.

[Lynch 02a] J.P. Lynch. Decentralization of Wireless Monitoring and Control Technologies for Smart Civil Structures. Ph. d. thesis, Stanford University, 2002.

[Lynch 02b] J.P. Lynch, A. Sundararajan, K.H. Law, A.S. Kiremidjian, T.W. Kenny, E. Carryer. Computational Core Design of a Wireless Structural Health Monitoring System. Tagungsband: Proceedings of the Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'02) conference, Pusan, Korea, August 2002.

[Lynch 03] J.P. Lynch, A. Sundararajan, K.H. Law, H. Sohn, C. Farrar. Design of Wireless Sensor Units with Embedded Statistical Time-Series Damage Detection Algorithms for Structural Health Monitoring. Tagungsband: Caltrans/UCSD Workshop on Structural Health Monitoring and Diagnostics of Bridge Infrastructure, San Diego, CA, USA, March 2003.

[Maes 95] P. Maes. Artificial life meets entertainment: Lifelike autonomous agents. Communications of the ACM, Special Issue on New Horizons of Commercial and Industrial AI, 38(11):108 – 114, November 1995.

[Maierhofer 03] C. Maierhofer, M. Krause, E. Niederleithinger, H. Wiggenhauser. Nondestructive testing methods at bam for damage assessment and quality assurance in civil engineering. Tagungsband: International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering, Berlin, 2003.

[Marx 06] A. Marx. Entwicklung eines Software-Agenten zur Integration von FEM-Software in ein agentenbasiertes Talsperren-Monitoring-System. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2006.

[Masera 95] A. Masera, S. Lancini, F. G. Piccinelli. Application of a Knowledge Support System to Dam Safety: a User Report. Tagungsband: IABSE Colloquium Knowledge Support Systems in Civil Engineering, Seiten 217 – 220, Bergamo, 1995. International Association for Bridge and Structural Engineering.

[Mayfield 96] J. Mayfield, Y. Labrou, T. Finin. Evaluating KQML as an Agent Communication Language. Intelligent Agents II, LNAI, 1037:347 – 360, 1996.

[Mehdianpour 04] M. Mehdianpour, W. Rücker, R. G. Rohrmann. Zur Tragfähigkeitsbewertung bestehender Bauwerke. Stahlbau, 73(4):236–241, 2004.

[Metzler 04] H. Metzler. Die Erhaltung von Brücken — eine umfassende strategische Aufgabe. Bauingenieur, 79(7/8):329 – 335, Juli/August 2004.

[Meyer 07] J. Meyer, R. Bischoff, G. Feltrin, M. Krüger, P. Chatzichrisafis, C. Grosse. Data analysis and reduction methodologies for wireless sensor networks. report d5.8. 2009.01.19.

[Minnesota Department of Transportation 08] Minnesota Department of Transportation. Interstate 35w bridge collapse. `http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/`. Online-Quelle, 2008.09.05.

[Mittrup 02] I. Mittrup. Entwicklung eines web-basierten Talsperren-Monitoring-Systems. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2002.

[Mittrup 04] I. Mittrup, K. Smarsly, J. Bilek. Implementierung eines Software-Agenten zur Verwaltung komplexer Datenbestände aus dem Bauwesen. In J. Zimmer, S. Geller, Hrsg., Tagungsband: 16. Forum Bauinformatik 2004, Braunschweig, Deutschland, 2004. Verein Deutscher Ingenieure.

[Mittrup 05] I. Mittrup. Modellbasierte Prognose des Bauwerksverhaltens mithilfe von Software-Agenten. In Weber. L., F. Schley, Hrsg., Tagungsband: 17. Forum Bauinformatik – Junge Wissenschaftler forschen, Cottbus, 2005.

[Mufti 01] A. Mufti. Guidelines for Structural Health Monitoring. ISIS Canada, design manual no. 2 Auflage, September 2001.

[Müller-Slany 03] H. Müller-Slany. Möglichkeiten und Grenzen der Schwingungsdiagnose für mechanische Systeme auf der Basis numerischer Strukturmodelle. Festschrift Prof. Dr.-Ing. Hans I. Weber. 2008.05.07.

[Muller 95] J. P. Muller, M. Pischel, M. Thiel. Modelling reactive behaviour in vertically layered agent architectures. In M. Wooldridge, N. R. Jennings, Hrsg., Tagungsband: In-

telligent Agents: Theories, Architectures and Languages (LNAI 890), Seiten 261 – 276. Springer-Verlag, Heidelberg, 1995.

[Myers 00] B Myers. Optimization of dam monitoring systems: Review of the available technology and case studies. Tagungsband: Proceeding of the 20th International Commission on Large Dams (ICOLD) Congress, 2000.

[Neagu 06] N. Neagu, K. Dorer, D. Greenwood, M. Calisti. LS/ATN: Reporting on a Successful Agent-Based Solution for Transport Logistics Optimization. Tagungsband: Proceedings of the IEEE 2006 Workshop on Distributed Intelligent Systems (WDIS '06), Prague, 2006.

[Nguyen 07] V. Nguyen, K. Smarsly, D. Hartmann. A computational steering approach towards sensor placement optimization for structural health monitoring using multi-agent technology and evolutionary algorithms. Tagungsband: Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM07), Stanford, USA, 2007.

[Nikraz 06] M. Nikraz, G. Caire, PA. Bahri. A methodology for the analysis and design of multi-agent systems using jade. Internal Journal of Computer Systems Science and Engineering, 2006. `http://jade.tilab.com/doc/`.

[NW-IALAD 05] NW-IALAD. Integrity assessment of large concrete dams. `http://nw-ialad.uibk.ac.at`. Online-Quelle, 2008.05.24.

[Nwana 96] H. S. Nwana. Software agents: An overview. Knowledge Engineering Review, 11(3):205 – 224, 1996.

[Open Geospatial Consortium 09] Open Geospatial Consortium. OpenGIS Sensor Model Language (SensorML). `http://www.opengeospatial.org/standards/sensorml`. Online-Quelle, 2009.06.11.

[Oppliger 06] J. Oppliger, T. Heiniger. Specification of mobile collection of data and transmission (D4.1.5.1).

[Padula 99] S.L. Padula, R.K. Kincaid. Optimization strategies for sensor and actuator placement. NASA no. 19990036166. 2008.05.07.

[Park 06] C. Park, P.H. Chou. Ambimax: Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes. Tagungsband: Proceedings of the Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. SECON 06, Band 1, Seiten 168 – 177. Citeseer, 2006.

[Pauk 97] A. Pauk. Technologie und Anwendung intelligenter Agenten als Mittler in elektronischen Märkten. Diplomarbeit, Fakultät für Verwaltungswissenschaft, Universität Konstanz, 1997.

[R Development Core Team 09] R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2009. ISBN 3-900051-07-0.

[Rao 91] A. S. Rao, M. P. Georgeff. Modeling rational agents within a bdi architecture. In R. Fikes, R. Sandewall, Hrsg., Tagungsband: Proceedings of Knowledge Representation and Reasoning, Seiten 473 – 484, San Mateo, Kalifornien, 1991.

[Rao 95] A. S. Rao, M. P. Georgeff. Bdi agents: From theory to practice. In V. Lesser, Hrsg., Tagungsband: Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95), Seiten 312 – 319, Cambridge, MA, USA, 1995. The MIT Press.

[Red Hat Middleware, LLC 09] Red Hat Middleware, LLC. Hibernate — Relational Persistence for Java and .NET. `www.hibernate.org`. 2009.11.04.

[RI-EBW-PRÜF 07] RI-EBW-PRÜF. Prüfung und Überwachung von Brücken, Tunneln und anderen Ingenieurbauwerken — Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung und Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr.

[Rißler 98] P. Rißler. Talsperrenpraxis. Oldenbourg, 1998.

[Rißler 99] P. Rißler. Anpassung der ennepetalsperre an die allgemein anerkannten regeln der technik. Tagungsband: 29. Internationales Wasserbau-Symposium, Band 120 of Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, Januar 1999.

[Ruben 05] J. Ruben. Ein Multi-Agenten-System zur verteilten p-adaptiven Finite-Elemente-Simulation am Beispiel der Baugrund-Tragwerk-Interaktion. Doktorarbeit, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt, 2005.

[Rücker 06] W. Rücker, F. Hille, R. Rohrmann. Guideline for the assessment of existing structures. Technische Richtlinie, SAMCO, 2006.

[Ruhrverband 08] Ruhrverband. Ruhrverband. `http://www.ruhrverband.de`. Online-Quelle, 2008.01.29.

[Ruhrverband 99] Ruhrverband. Möhnetalsperre. Vertiefte Überprüfung — Mathematisch-statistische Analyse der Messdaten. Technischer Bericht, Ruhrverband, 1999.

[Rytter 93] A. Rytter. Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures. Ph. d. thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University., Aalborg, Dänemark, 1993.

[Salvaneschi 95] P. Salvaneschi, M. Lazzari, S. Lancini, A. Masera, R. Menga, G. Mazza. Diagnostic Reasoning in Monitoring of Civil Engineering Structures. Tagungsband: IABSE Colloquium Knowledge Support Systems in Civil Engineering, Seiten 187 – 196, Bergamo, 1995. International Association for Bridge and Structural Engineering.

[SAMCO 08] SAMCO. Thematic network for Structural Assessment, Monitoring and Control. http://www.samco.org/. Online-Quelle, 2008.04.14.

[Santa 04] U. Santa, K. Bergmeister, A. Strauss. Bauwerksüberwachung der Autobahnbrücke Gossensaß. Beton- und Stahlbetonbau, 99(12):975 – 984, 2004.

[Santa 05] U. Santa, K. Bergmeister. Zustandsüberwachung und Bewertung von Betontragwerken. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2005, 100, 2005.

[Sauron Software 09] Sauron Software. cron4j - a pure Java cron-like scheduler. `www.sauronsoftware.it/projects/cron4j`. 2009.11.04.

[Schüeller 97] G.I. Schüeller. Structural reliability - recent advances. In N. Shiraishi, M. Shinozuka, Y.K. Wen, Hrsg., Tagungsband: Proceedings of ICOSSAR 97 - The 7th International Conference on Structural Safety and Reliability, Band 1, Seiten 3–35, Kyoto, Japan, 1997. A.A. Balkema.

[Searle 69] J. Searle. Speech Acts. Cambridge University Press, Cambridge, MA, USA, 1969.

[Smarsly 08] K. Smarsly. Autonome Bauwerksüberwachung. Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2008.

[Smith 80] R. Smith, R. Davis. The contract net protocol: High level communication and control in a distibuted problem solver. IEEE Transactions on Computers, 29(12):1104 – 1113, 1980.

[Sohn 01] H. Sohn, C.R. Farrar. Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals. Smart Materials and Structures, 10(3):446 – 451, 2001.

[Sonderforschungsbereich 398 08] Sonderforschungsbereich 398. Lebensdauerorientierte entwurfskonzepte unter schädigungs- und deteriorationsaspekten. `http://www.ruhr-uni-bochum.de/sfb398/`. 2009.11.20.

[Spectral Dynamics, Inc. 09] Spectral Dynamics, Inc. STAR Modal. `http://www.spectraldynamics.com/`. Online-Quelle, 2009.11.24.

[Stanford Center for Biomedical Informatics Research 08] Stanford Center for Biomedical Informatics Research. The protege ontology editor and knowledge acquisition system. `http://protege.stanford.edu/`. Online-Quelle, 2008.01.30.

[Stangenberg 09] F. Stangenberg, R. Breitenbücher, O. T. Bruhns, D. Hartmann, R. Höffer, D. Kuhl, G. Meschke, Hrsg. Lifetime-oriented Structural Design Concepts. Springer, Berlin, 2009. ISBN 978-3-642-01461-1.

[Structural Vibration Solutions A/S 09] Structural Vibration Solutions A/S. Artemis — software for operational modal analysis. `http://www.svibs.com/`. Online-Quelle, 2009.11.23.

[Sun Microsystems, Inc. 09] Sun Microsystems, Inc. Java Communications API. `http://java.sun.com`. Online-Quelle, 2009.10.02.

[Sustainable Bridges 07] Sustainable Bridges. Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives. `http://www.sustainablebridges.net/`. Online-Quelle, 2008.04.22.

[Taffe 03] A. Taffe, C. Maierhofer. Guidelines for NDT methods in civil engineering. Tagungsband: International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering, Berlin, 2003.

[Tesauro 04] G. Tesauro, D. M. Chess, W. E. Walsh, R. Das, A. Segal, I. Whalley, J. O. Kephart, S. R. White. A multi-agent systems approach to autonomic computing. Tagungsband: Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2004), New York, USA, 2004. IEEE Computer Society.

[Theiß 05] M. Theiß. Agentenbasierter Modellverbund am Beispiel des baulichen Brandschutzes in der Gebäudeplanung. Doktorarbeit, Institur für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen, Technische Universität Darmstadt, 2005.

[Visualization-Analysis Sensor Technology 09] Visualization-Analysis Sensor Technology. Introduction into SensorML. `http://vast.uah.edu/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=52`. Online-Quelle, 2009.06.11.

[Waller 89] H. Waller, R. Schmidt. Schwingungslehre für Ingenieure. BI-Wissenschaftsverlag, 1989.

[Wellmann Jelic 05] A. Wellmann Jelic, J. Bilek, M. Gallfy, D. Hartmann. Parallel software framework for fatigue analyses based on software agents. Tagungsband: International Conference on Computing in Civil Engineering (ICCC), Cancun, Mexiko, Juli 2005.

[Wellmann-Jelic 07] A. Wellmann-Jelic. Paralleles Simulationskonzept für zeitabhängige Zuverlässigkeitsanalysen bei stochastischen Ermüdungsprozessen. Doktorarbeit, Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2007.

[Wikipedia 08] Wikipedia. Die freie Enzyklopädie (deutsche Version). `http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptseite`. Online-Quelle, 2008.09.11.

[Willm 67] G. Willm, N. Beaujoint. Les méthodes de surveillance des barrages au service de la production hydraulique d'Electricité de France, problèmes anciens et solutions nouvelles. Tagungsband: IXth International Congress on Large Dams, Band III, Seiten 529 – 550, Istanbul, 1967. ICOLD.

[Witten 99] I.H. Witten, E. Frank. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. Morgan Kaufmann, 1999.

[Wooldridge 00] M. Wooldridge, N.R. Jennings, D. Kinny. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 3(3):285–312, 2000.

[Wooldridge 01] M. Wooldridge. Introduction to Multiagent Systems. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 2001.

[Wooldridge 95] M. Wooldridge, N.R. Jennings. Intelligent Agents: Theory and Practice. Knowledge Engineering Review, 10(2):115–152, 1995.

[Zambonelli 03] F. Zambonelli, N.R. Jennings, M. Wooldridge. Developing multiagent systems: The Gaia methodology. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM), 12(3):317–370, 2003.

[Ziegler 07] C. Ziegler. Sinn oder nicht Sinn. c't – Magazin für Computertechnik, 21:172, 2007.